

陆空多模态机器人技术研究现状及展望

李欣茹¹ 王家添¹ 陈一同¹ 金艺畅¹ 丁希仑¹ 张容静¹ 王成才¹

摘要 陆空多模态机器人在灾害救援、特种巡检、外星探索等方面展现出重要的应用潜力,具有环境适应性强、续航时间长、任务连续性好等优势,其运动过程涵盖地面移动、起飞、飞行与着陆等多个运动环节.各模态下的精准运动控制及不同模态间的稳定转换,是保障陆空多模态机器人高效、可靠执行探测与救援等任务的关键.本文系统总结国内外陆空多模态机器人的近期研究,阐述不同类型机器人的构型特点、驱动方式及运动机理.在此基础上,重点分析其在复杂地形下的障碍感知与稳定移动、非结构化环境中的自主稳定起飞、气流扰动下的稳定飞行与轨迹保持以及地面效应与触地冲击下的缓冲着陆等关键技术.最后,阐述陆空多模态机器人自主化与智能化运动面临的挑战及发展趋势.

关键词 陆空多模态机器人;障碍感知;稳定控制;跨域运动

引用格式 李欣茹,王家添,陈一同,金艺畅,丁希仑,张容静,王成才.陆空多模态机器人技术研究现状及展望.自动化学报,2026,52(5):909-931

DOI 10.16383/j.aas.c250681 **CSTR** 32138.14.j.aas.c250681

Research Status and Prospects of Terrestrial-aerial Multimodal Robots

LI Xin-Ru¹ WANG Jia-Tian¹ CHEN Yi-Tong¹ JIN Yi-Chang¹ DING Xi-Lun¹
ZHANG Rong-Jing¹ WANG Cheng-Cai¹

Abstract Terrestrial-aerial multimodal robots demonstrate significant application potential in disaster rescue, special-purpose inspection, and extraterrestrial exploration, with the advantages of strong environmental adaptability, long operational endurance, and high task continuity. Their motion process can be divided into multiple phases, such as ground locomotion, takeoff, flight, and landing. Precise motion control under each modality and stable transitions between different modalities are key to ensuring that terrestrial-aerial multimodal robots can efficiently and reliably perform tasks such as exploration and rescue. This paper systematically reviews recent research on terrestrial-aerial multimodal robots at home and abroad, focusing on their configuration characteristics, actuation modes, and motion principles. On this basis, key technologies are analyzed in depth, including obstacle perception and stable locomotion over complex terrains, autonomous and stable takeoff in unstructured environments, stable flight and trajectory maintenance under airflow disturbances, and buffered landing under ground effect and touch-down impact. Finally, the challenges and emerging trends toward autonomous and intelligent motion for terrestrial-aerial multimodal robots are elaborated.

Keywords terrestrial-aerial multimodal robots; obstacle perception; stable control; cross-domain motion

Citation Li Xin-Ru, Wang Jia-Tian, Chen Yi-Tong, Jin Yi-Chang, Ding Xi-Lun, Zhang Rong-Jing, Wang Cheng-Cai. Research status and prospects of terrestrial-aerial multimodal robots. *Acta Automatica Sinica*, 2026, 52(5): 909-931

在灾害救援^[1]、特种巡检^[2]、外星探索^[3]等复杂任务中,单一模态机器人存在性能瓶颈:飞行机器

人虽然机动性高、响应速度快,但受限于续航与载荷能力,难以长时间作业^[4-5];地面机器人在载荷能力与续航时间方面更具优势,且能执行精细操作,但其障碍跨越能力有限,在断崖、沟壑等非结构化地形中适应性不足^[6-7].陆空多模态机器人融合两者优势,可利用飞行模态实现快速部署,并依托地面模态开展精细操作,是执行灾害救援等复杂任务的核心利器^[8-10].

陆空多模态机器人的发展经历结构叠加、形态变构和组合分离三个阶段,实现从模态叠加到智能协同作业的演进^[11].2000年,美国佐治亚理工学院提出仿蝴蝶机器人,首次通过结构叠加实现陆空运动的融合,其在传统扑翼机器人上集成腿部结构,

收稿日期 2025-12-01 录用日期 2026-02-13
Manuscript received December 1, 2025; accepted February 13, 2026

多栖平台驱动系统全国重点实验室开放基金,国家自然科学基金(52405003),北京市科技新星计划,中央高校基本科研业务费,中央高校青年教师科研创新能力支持项目(ZY2025140)资助

Supported by Open Fund of the National Key Laboratory of Multi-Modal Vehicle Propulsion Systems, National Natural Science Foundation of China (52405003), Beijing Nova Program, Fundamental Research Funds for the Central Universities, and Scientific Research Innovation Capability Support Project for Young Faculty of Central Universities (ZY2025140)

本文责任编辑 刘志杰

Recommended by Associate Editor LIU Zhi-Jie

1. 北京航空航天大学 北京 100190

1. Beihang University, Beijing 100190

既能飞行又能行走,具备执行外星探索任务的潜力^[12]. 2010年,美国明尼苏达大学研究出首个形态变构式陆空多模态机器人,其通过旋翼的折叠与展开,实现“滚动-飞行”两种运动模态的灵活转换,有效减少了结构冗余,提升了模态转换效率^[13]. 2013年,日本东北大学将六旋翼飞行机器人与小型地面机器人组合,设计组合分离式陆空多模态机器人系统,利用飞行机器人运输、地面机器人投放,实现远距离快速部署与地面精细探测的结合,可在火山中执行观测与采样任务^[14].

随着废墟救援、特种巡检、外星探索等任务需求的增加,研发自主化与智能化的陆空多模态机器人势在必行^[15]. 依据构型特点对现有陆空多模态机器人进行分类,如图1所示,并梳理其在运动过程中涉及的关键技术以及面临的挑战和发展趋势,主

要工作和贡献如下: 1) 总结国内外在陆空多模态机器人领域的研究进展,阐述各类机器人的构型特点、运动机理、驱动方式以及应用场景; 2) 对陆空多模态机器人复杂地形下的障碍感知与稳定移动、非结构化环境中的自主稳定起飞、气流扰动下的稳定飞行与轨迹保持以及地面效应与触地冲击下的缓冲着陆等关键技术进行分析; 3) 面向未来任务需求,阐述实现陆空多模态机器人自主化与智能化运动所面临的挑战及发展方向.

1 陆空多模态机器人研究现状

1.1 结构叠加式陆空多模态机器人

结构叠加式陆空多模态机器人通过将空中运动单元与轮式机构、笼式机构或多关节步态机构结合,



图 1 陆空多模态机器人分类

Fig.1 Classification of terrestrial-aerial multimodal robots

实现飞行模态与地面运动模态的融合, 在不同运动模态间转换时, 其整体形态基本保持不变. 根据所集成地面运动机构, 结构叠加式陆空多模态机器人可分为轮式、笼式和足式, 其具体分类及研究现状如表 1 所示.

1.1.1 轮式陆空多模态机器人

轮式机器人在平坦地面移动速度快、能耗低且控制简单, 无需复杂步态算法, 广泛应用于地面巡检与物资运输等任务^[16-17]. 基于上述特点, 研究人员在飞行机器人基础上叠加轮组, 发展出轮式陆空多模态机器人. 根据轮组是否具备独立驱动能力, 该类机器人可进一步划分为被动轮式和主动轮式两种类型.

被动轮式陆空多模态机器人的轮组不具备独立驱动功能, 通过将旋翼产生的升力或气流分量转化为水平方向推力实现地面运动^[18]. 2014 年, 日本东京理科大学的 Ootsuka 等^[19]设计了一种用于空地作战的陆空多模态机器人, 在四旋翼飞行机器人下方的亚克力板上固定安装四个被动轮, 通过倾斜机体姿态使螺旋桨推力产生水平分量实现地面运动, 但其推力方向调节能力有限, 地面机动性不足. 2020 年, 美国亚利桑那州立大学的 Mishra 等^[20]设计空地两用飞行器 (unmanned aerial-ground vehicle, UAGV), 如图 2(a) 所示. 在电机下方引入可调导流板, 调节螺旋桨下洗气流方向和强度, 获得了稳定且精确的地面推进力. 然而, 额外的结构增加了机器人复杂性与重量. 2021 年, 浙江大学的 Li 等^[21]设计陆空多模态机器人, 如图 2(b) 所示. 通过倾斜旋翼主动调控推力方向, 并利用前后旋翼倾角差实现灵活的地面转向, 无需额外导流结构.

主动轮式陆空多模态机器人通过内置电机及传动机构实现对轮组的直接驱动, 在地面模态下具备快速启停和灵活转向的能力, 机动性与控制精度较高^[22]. 然而, 这种设计通常会引入额外质量, 影响续航能力, 研究中普遍采用高强度轻质材料对结构进行优化设计. 此外, 在执行任务时, 机器人旋翼易与

外界障碍物发生碰撞, 为提高安全性, 部分研究在设计中引入防护框架. 2017 年, 日本早稻田大学的 Tanaka 等^[23]设计了一种小型陆空多模态机器人, 如图 2(c) 所示. 其主体采用碳纤维复合材料, 利用电机直接驱动带稳定器的主动轮组, 通过增大轮径、减小轮宽的方式, 使轮组对旋翼提供一定程度的侧向防护, 同时降低接触摩擦. 2020 年, 美国加州理工学院的 Kalantari 等^[24]设计 Drivocopter 机器人, 如图 2(d) 所示. 其旋翼外有四个由碳纤维构成的可独立驱动的球形轮, 能在地面模态下实现全向运动, 同时避免旋翼下洗气流引起的灰尘干扰, 降低了传感器受损的风险, 显著提高了感知稳定性.

然而, 轮式陆空多模态机器人越障能力较弱, 台阶、沟壑或松散沙石等地形易导致轮组打滑或陷落, 使机器人行动失效^[25], 限制了其在野外废墟、山地等非结构化环境中的应用潜力. 未来可发展轮腿复合机构以提升机器人越障能力, 从而提升其在复杂环境中的适应性.

1.1.2 笼式陆空多模态机器人

笼式陆空多模态机器人通过在飞行机器人外集成高强度轻质保护笼, 能在地面模态下实现滚动式移动, 并有效避免旋翼与机体受损, 显著提高了机器人抗碰撞能力^[26]. 根据外部笼体几何结构差异, 可分为圆柱形笼、环形笼与球形笼三种类型.

2013 年, 美国伊利诺伊理工学院的 Kalantari 等^[27]开发 HyTAQ 机器人, 如图 3(a) 所示. 该机器人在传统四旋翼飞行机器人外集成可自由旋转的圆柱形保护笼, 笼体利用轴承与飞行机器人相连, 通过调节螺旋桨推力差实现地面滚动与转向控制, 这是圆柱形笼结构的代表性工作, 奠定了后续笼式陆空多模态机器人的基本结构范式. 日本东京大学的 Kawasaki 等^[28]同年设计的 MUWA 机器人是环形笼结构的典型代表, 如图 3(b) 所示. 其环形笼框架采用超轻聚苯乙烯泡沫材料, 不仅能在水上漂浮, 还可在地面模态中作为滚动主体. 该机器人利用变距螺旋桨产生的推力和扭矩, 可实现倾斜站立、滚

表 1 结构叠加式陆空多模态机器人分类及研究现状

Table 1 Classification and research status of superimposed-structure terrestrial-aerial multimodal robots

类别	优势	限制	运动特点	
轮式	被动轮式	结构简单、轻量化、能耗低	控制精度低、机动性差	依赖旋翼推力分量驱动轮体滚动
	主动轮式	机动性强、控制精度高	结构复杂、质量增加	轮组独立驱动, 可实现精确地面运动
笼式	圆柱形笼式	抗碰撞能力强	感知遮挡	旋翼推力驱动圆柱形笼实现地面滚动
	环形笼式	结构轻质、可穿越狭窄环境	刚度有限、承载能力低	旋翼推力驱动环形笼实现地面滚动
	球形笼式	运动解耦、抗冲击能力强	机构复杂、感知受限	外球壳滚动、内部飞行器姿态独立, 陆空运动解耦
足式	双足式	灵活性高、可执行精细操作	能耗高	可模拟人类步态, 完成攀爬、跨越等复杂动作
	多足式	稳定性高、越障能力强	控制复杂	具备多点支撑结构, 可适应复杂地形

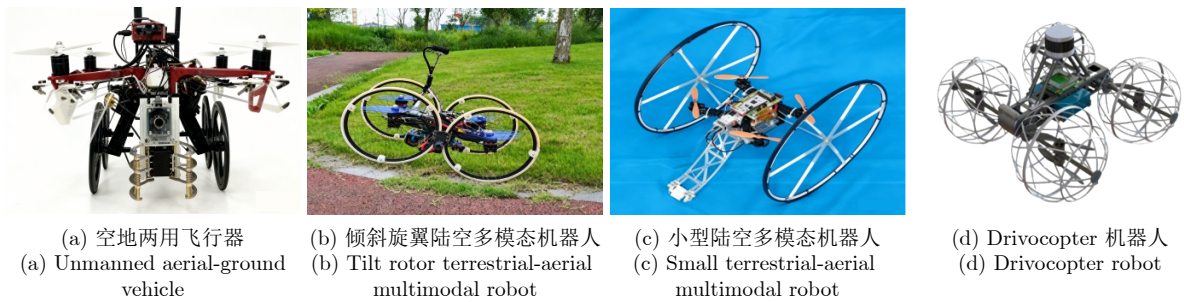


图 2 轮式陆空多模态机器人

Fig.2 Wheeled terrestrial-aerial multimodal robots

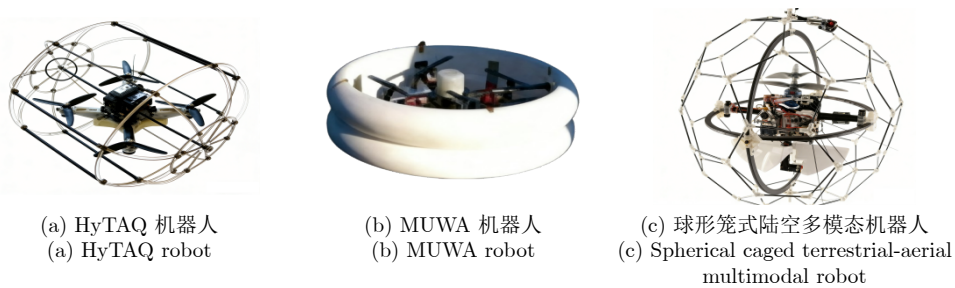


图 3 笼式陆空多模态机器人

Fig.3 Caged terrestrial-aerial multimodal robots

动等多种地面运动,在狭窄空间中具有较高的机动灵活性.球形笼结构的代表成果为2014年瑞士洛桑联邦理工学院的Briod等^[29]设计的机器人,如图3(c)所示.该机器人在球形笼内部嵌入万向节系统,用于解耦飞行机器人与地面滚动机构之间的运动耦合.在多次碰撞后,万向节系统仍能通过自由旋转有效分散冲击能量,降低切向恢复系数,显著减少了内部飞行机器人的姿态扰动.

然而,笼式陆空多模态机器人的外部笼体在一定程度上遮挡传感器视场,影响其环境感知与导航性能^[30].未来需采用高强度轻质材料与拓扑优化结构实现笼体轻量化与高防护性的统一,同时优化传感器布局以减少视场遮挡.

1.1.3 足式陆空多模态机器人

足式机器人凭借多关节结构与仿生步态设计,能够通过动态调整支撑模式与足端轨迹以适应复杂地形条件,在丘陵、山地等非结构化环境中表现出优异的越障能力,具备执行精细操作任务的潜力^[31].研究人员将足式机构与空中运动单元融合,发展出兼具地面步行与空中飞行能力的足式陆空多模态机器人.根据腿部数量,可将其分为双足式与多足式.

双足式陆空多模态机器人结合双足机器人与飞行机器人优势,姿态控制精度高,可在狭窄环境中执行复杂任务^[32].2021年,美国加州理工学院的Kim等^[33]研发LEONARDO(LEO)人形陆空机器

人,如图4(a)所示.通过联合控制旋翼推力与腿部伺服驱动器,实现了绳索行走、滑板运动等高难度平衡动作.然而,LEO在执行上述高平衡性任务时需依赖旋翼持续输出升力以维持姿态平衡,能耗较高,限制了其在长续航任务中的应用.为解决足式陆空多模态机器人续航能力受限的问题,研究人员开始探索不同于传统电推进的全新技术路线.2025年,意大利技术研究院的Paolino等^[34]在iRonCub-Mk1人形机器人的基础上集成喷气式发动机推进系统,如图4(b)所示.高密度燃料显著提升了其推力输出能力与续航潜力,为足式陆空多模态机器人在大载荷任务中的应用提供了新的思路.

多足式陆空多模态机器人依托多足冗余支撑,在地面模式下具备更高的静态稳定性和地形适应能力,适用于崎岖不平或高度不确定性的地表环境^[35].扑翼在低雷诺数条件下具备较高气动效率和良好机动性,在微型机器人中应用广泛^[36].2021年,美国华盛顿大学的Chukewad等^[37]设计昆虫尺度扑翼机器人RoboFly,如图4(c)所示.其采用压电陶瓷制动器激励扑翼在共振频率下实现飞行,引入二次谐波调整机制使扑翼上下拍动频率产生可控差异,在地面模式下形成净推力驱动机器人滑行,并通过差分调节左右扑翼的拍动频率,实现对方向的精确控制.然而,扑翼推进力有限,在机器人重量较大或需

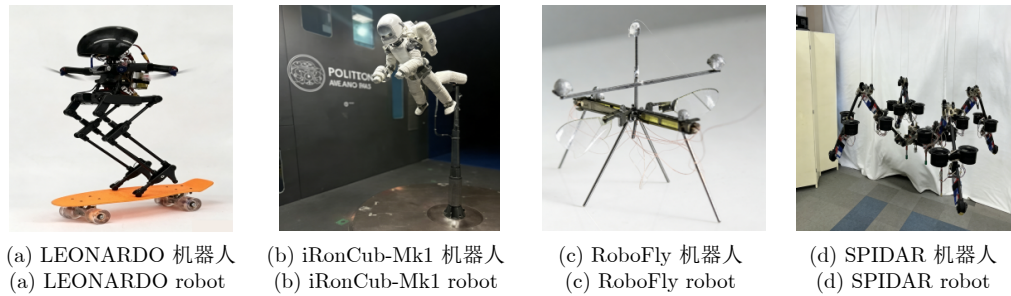


图 4 足式陆空多模态机器人

Fig. 4 Legged terrestrial-aerial multimodal robots

要更高控制效率的场景下,常用旋翼作为主要推进机构. 2025年,日本东京大学的Zhao等^[38]设计四足旋翼机器人SPIDAR,如图4(d)所示.采用分布式球形可转向转子作为统一动力单元,每个转子内集成一对旋翼,在飞行模式下调节推力矢量实现全向飞行与姿态控制,在地面模式下辅助关节运动以维持稳定步态,为陆空多模态机器人在动力复用与系统集成方面提供了技术路径.

然而,当前足式陆空多模态机器人在陆地移动过程中足-地接触力实时估计能力不足,且腿部与飞行推进系统之间的能量分配有待提升.未来应发展高精度足-地接触感知与力反馈技术,提高机器人在复杂地形下的稳定行走能力,并构建腿部与飞行推进系统一体化的动力复用结构,从而优化能量分配以降低整体能耗.

1.2 形态变构式陆空多模态机器人

受自然界生物通过折展翅膀与肢体伸缩实现运动模式转换的机制启发^[39],形态变构式陆空多模态机器人可以根据任务需求或环境条件进行自适应变形,在陆地移动和空中飞行之间高效转换,避免了结构冗余与系统耦合问题.根据变形部位和变构方式的不同,可进一步分为翼变形式和体变形式两类,其具体分类及研究现状如表2所示.

1.2.1 翼变形式陆空多模态机器人

自然界中,蝙蝠^[40]和飞鼠^[41]等生物通过翼膜的

柔性变形实现飞行与地面运动的转换,在复杂环境中展现出卓越的适应能力.受此启发,研究者们将翼变形机制引入陆空多模态机器人的设计中,通过机翼的形态重构,实现地面行走、跳跃、滑翔及飞行等多种运动模式之间的转换,为陆空多模态运动融合提供了新的技术路径.

2014年,美国卡内基梅隆大学的Woodward等^[42]基于吸血蝙蝠的可变形翼膜,设计兼具跳跃与滑翔能力的小型多模态机器人MultiMo-Bat,如图5(a)所示.该机器人腿部采用四连杆机构实现能量存储与释放,在起跳过程中通过调节连杆构型使翼面被动同步展开,从而实现陆空模式的平滑转换.相较于刚性翼,柔性翼能通过弹性形变推迟失速迎角,从而改善气动稳定性^[43].2018年,美国伊利诺伊大学的Shin等^[44]设计仿飞鼠机器人,如图5(b)所示.该机器人采用硅胶制成的柔性膜作为翼面材料,在地面模式时翼膜处于松弛贴附状态以避免运动干涉,飞行模式下伸展腿部关节将翼膜被动张紧,形成具备弹性变形能力的气动翼面.

被动变形翼在空中续航能力有限且方向可控性差,随着应用场景复杂度与任务需求的持续提升,部分研究引入主动变形翼,以提升机器人飞行气动性能以及模式转换能力.瑞士洛桑联邦理工学院的Daler等^[45-47]设计DALER机器人,如图5(c)所示.在飞行模式下机翼展开,根据需要主动调节机翼姿态以获得更优的升力与飞行控制效果;在地面模式

表 2 形态变构式陆空多模态机器人分类及研究现状

Table 2 Classification and research status of morphing reconfigurable terrestrial-aerial multimodal robots

类别	变形方式	优势	限制
翼变形式	机翼被动变形	模式转换连续性好、结构轻量化、气动稳定性较高	变形可控性有限、环境适应性受限
	机翼主动变形	功能复用度高、结构集成度高、变形可控性好	机翼易受环境损伤、结构耐久性不足
体变形式	旋翼折展	结构紧凑、模式转换效率高	折展机构易疲劳、长期可靠性不足
	腿部伸展	空间适应性强、具备壁面运动能力	机构复杂、控制耦合度高
	多自由度变形	形态灵活、运动模式丰富、环境适应性强	控制复杂、系统能耗较高
	柔性变形	柔顺性好、可穿越狭窄空间	控制精度有限、承载能力有限

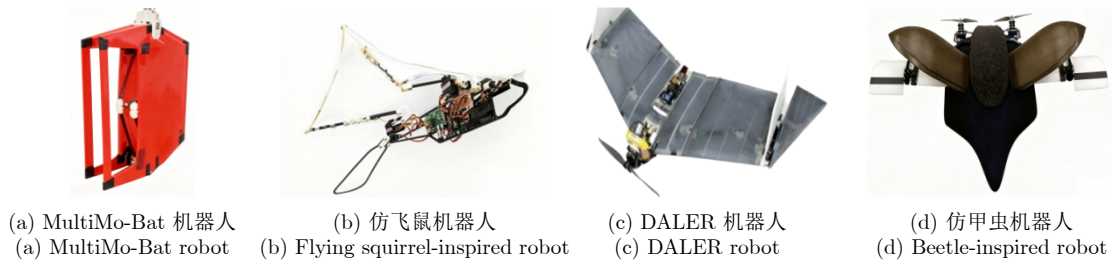


图 5 翼变形式陆空多模态机器人

Fig.5 Wing-morphed terrestrial-aerial multimodal robots

下,机翼绕前轴主动旋转,翼尖触地辅助行走.该设计实现了机翼的功能复用,有效降低了结构复杂度与整机质量,提升了续航能力与能量利用效率.然而,机翼长期外露易导致结构损伤,限制了其在复杂环境中的可靠性.2022年,瑞士洛桑联邦理工学院的Vourtsis等^[48]设计仿甲虫机器人,如图5(d)所示.在机器人主翼外有一对可开合的鞘翅结构,在飞行模式下鞘翅展开辅助产生升力,在地面模式下鞘翅则闭合保护主翼,有效提升了其在恶劣环境中的耐久性.

翼变形式陆空多模态机器人在运动模式转换连续性与结构功能集成性方面展现出显著优势,但其机翼在长期循环变形与环境冲击下易产生疲劳损伤,耐久性有待提升.未来可利用高疲劳寿命的柔性复合材料与仿生分层结构以增强机翼抗损伤能力,设计可折叠或可收纳翼结构以提高环境适应性,从而提升机器人在复杂环境中的长期可靠运行能力.

1.2.2 体变形式陆空多模态机器人

体变形式陆空多模态机器人通过收缩旋翼、调整质心、多自由度变形等方式,实现地面与空中运动模式之间的转换.2017年,美国明尼苏达大学的Morton等^[49]设计可折叠旋翼的微型陆空多模态机器人,如图6(a)所示.飞行模式下旋翼展开提供升力,地面模式下利用四连杆机构将旋翼收纳至机身内部,有效降低行驶阻力并显著提高抗碰撞能力.

然而,旋翼频繁折展容易出现机械疲劳、变形卡滞等问题,限制了机器人在长期连续任务中的可靠性^[50].基于伸展机制的陆空多模态机器人将飞行单元与陆地移动单元集成在同一机构上,通过机构的伸展变形实现飞行与陆地模式的转换^[51-53].以色列的David等^[53]在2021年设计FCSTAR机器人,如图6(b)所示.当腿部向下收拢且车轮着地时,机器人处于地面模式;当腿部完全伸展时,则转换至飞行模式.此外,该机器人还可以利用旋翼推力反转产生的法向附着力,实现在垂直壁面上的运动,

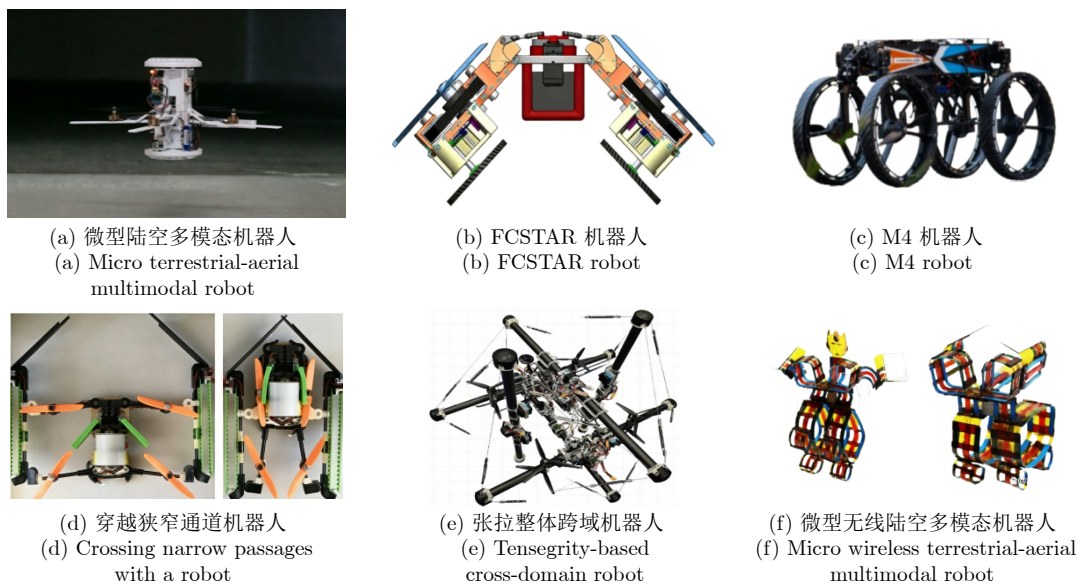


图 6 体变形式陆空多模态机器人

Fig.6 Body-morphed terrestrial-aerial multimodal robot

具有较高的运动灵活性.

在此基础上, 研究人员引入多自由度变形机制以增强形态变构式陆空多模态机器人的运动灵活性. 2023 年, 美国加州理工学院的 Sihite 等^[54] 提出 M4 机器人, 如图 6(c) 所示. 该机器人采用多附肢冗余驱动结构, 每个附肢包含两个独立旋转关节, 末端集成兼具推进与滚动功能的复合执行单元. 通过协调控制各关节姿态, 机器人可在地面行驶、飞行及斜面攀爬等多种运动模态间实现连续转换. 然而, 基于刚性机构的多自由度变形依赖离散关节运动, 整体柔顺性不足, 在狭窄复杂环境中的通过性受限. 部分研究引入柔性可变形结构, 在保证机器人尺度与功能集成的同时显著提升环境通过性与安全性. 2022 年, 瑞士苏黎世联邦理工学院的 Fabris 等^[55] 设计的穿越狭窄通道机器人, 采用软折叠框架实现了柔性变形, 如图 6(d) 所示. 其在飞行时通过磁关节锁定臂杆使之保持刚性, 当进入狭窄通道时磁关节释放, 臂杆在拉伸弹簧作用下转为柔性折叠状态, 从而通过狭缝. 然而, 这种被动响应的柔性变形策略在调控精度和可编程性方面存在不足. 2025 年, 北京理工大学陶子辰等^[56] 提出张拉整体跨域机器人, 如图 6(e) 所示. 在八旋翼飞行机器人外构建由刚性杆与柔性绳组成的外壳, 飞行模态下外壳作为高刚度防护结构; 地面模态下机臂分离, 通过调节绳索张力实现构型变换, 调节重心实现滚动. 同年, 清华大学的 Xu 等^[57] 设计微型无线陆空多模态机器人, 如图 6(f) 所示. 其在关节连接处集成由液晶弹性体和形状记忆合金复合而成的驱动器, 能够实现关节精确弯折与锁止, 从而完成机器人在飞行模态与地面模态之间的转换.

体变形式陆空多模态机器人在结构紧凑性、模态转换效率及空间适应性方面展现出显著优势, 然而其仍存在变形机构长期可靠性不足、控制系统耦合度高以及能量利用效率低等问题. 未来体变形式陆空多模态机器人应利用高耐久柔性材料与可重复变形机构以增强长期稳定性, 并结合主动可编程变形与能量回收机制提升模态转换效率与整体能量利用率, 推动其在复杂环境中的应用.

1.3 组合分离式陆空多模态机器人

组合分离式陆空多模态机器人的各运动单元既可分离独立执行任务, 也能通过连接机构组合协同工作, 在一定程度上缓解了结构叠加式与形态变构式陆空多模态机器人在重量、复杂度与能效上的权衡. 根据其构成单元是否一致, 现有研究可分为异构组合分离式陆空多模态机器人与同构组合分离式陆空多模态机器人, 其具体的分类及研究现状如表 3 所示.

1.3.1 异构组合分离式陆空多模态机器人

异构组合分离式陆空多模态机器人由飞行机器人与地面机器人构成, 可在任务过程中按需实现分离与组合, 从而融合两类机器人在机动性、续航与操作能力上的互补优势, 在灾害救援、环境探测等场景中具有广阔应用前景.

飞行机器人具备卓越的机动性和广域监视能力, 利用飞行机器人携带陆地机器人, 可以快速抵达陆地机器人难以到达的区域并将其精准部署至目标地点, 提升任务执行效率和灵活性. 2014 年, 中国台湾元智大学的 Latscha 等^[58] 设计的 H.E.R.A.L.D 机器人, 如图 7(a) 所示. 采用被动磁力机构实现空地对接, 在组合状态下通过模态隔离与主从控制策略, 将复合系统等效为单一主控平台, 避免了异构体强耦合动力学建模与协同控制问题, 但其对接过程基于准静态操作假设, 且精度依赖初始位姿条件, 在强扰动或高机动工况下, 对接鲁棒性较低. 2023 年, 北京航空航天大学 Deng 等^[59] 提出螺旋自旋对接机器人, 如图 7(b) 所示. 通过螺旋几何引导结构将三维位姿对接问题转化为旋转同步约束问题, 显著提升了对接容错能力. 对接后系统采用统一建模与分级控制策略, 由飞行机器人主导复合体姿态与位置控制, 地面机器人被动跟随, 缓解了构型突变引起的控制不稳定问题.

地面机器人具备更大的载荷能力和续航能力, 可以作为陆空任务执行的可靠载体, 同时为飞行机器人提供能源和信息支持, 从而提升系统的续航和决策能力. 2024 年, 同济大学的 Miao 等^[60] 设计履

表 3 组合分离式陆空多模态机器人分类及研究现状

Table 3 Classification and research status of composite separated terrestrial-aerial multimodal robots

分类	组合方式	组合体控制	优势	限制	对接方式
异构组合分离式	飞行机器人与地面机器人组合而成	飞行机器人主导, 地面机器人被动的从控制	快速部署、作业范围大	载荷有限、续航时间短	被动磁对接、螺旋自旋对接机构对接
		地面机器人主导, 飞行机器人被动的从控制	强承载力	地面机动性限制	固定收纳结构与伸缩连接机构
同构组合分离式	多个相同的机器人组成	群体协同控制	形态灵活、适应性强	成本高、能源管理复杂	永久电磁铁对接

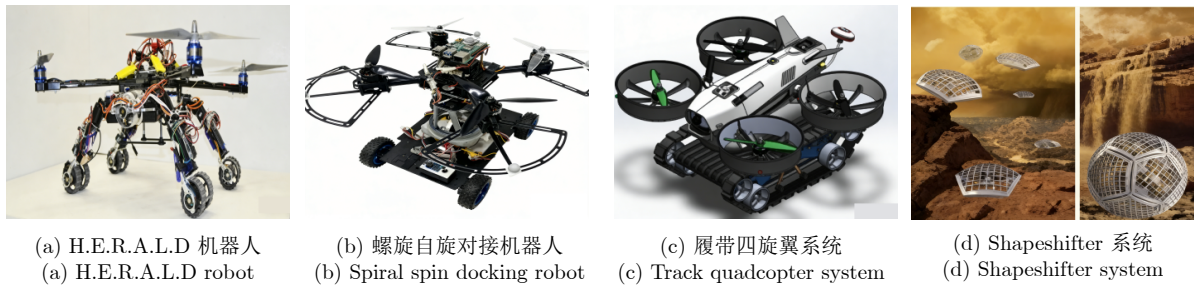


图 7 组合分离式陆空多模态机器人

Fig.7 Composite separated terrestrial-aerial multimodal robots

带四旋翼系统,如图7(c)所示.通过固定收纳结构与伸缩连接机构保证回收位姿一致性,将动态对接过程转化为重复性机械操作,从系统层面降低了对实时协同控制的依赖.组合状态下,地面平台统一承担能源管理、通信调度与任务协调功能,建立了清晰的控制权切换与系统管理机制,提高了系统整体运行的可控性和可靠性.

异构组合分离式陆空多模态机器人在结构引导对接、主从控制及系统管理等方面已取得阶段性进展.然而,现有研究多采用工程约束与模态隔离策略,将系统运行过程划分为若干相互独立的模态分别建模,对组合状态下的耦合动力学模型研究有限.未来,应进一步构建面向组合状态的统一耦合动力学模型与高鲁棒协同控制框架.在此基础上,结合学习方法实现对接策略与控制权分配的自适应优化,从而提升系统在强扰动与复杂任务场景下的自主协同能力.

1.3.2 同构组合分离式陆空多模态机器人

同构组合分离式陆空多模态机器人由多个结构一致的模块构成,各模块通过标准化对接机构实现连接与分离.依托无线网络、动态重组算法与分布式协同控制策略,该类系统能够在群体层面实现快速重构与功能自适应分配,从而具备在复杂环境中开展协同探测、分布式感知与多目标并行作业的能力.

2019年,美国国家航空航天局提出 Shapeshifter 系统^[6],用于火星表面综合探测任务,如图7(d)所示.该系统由封闭在半圆柱形外壳内的飞行机器人组成,机器人之间可通过外壳表面布置的永久电磁铁实现快速对接,重构为球形结构,利用螺旋桨推力驱动整体滚动.该设计通过模块化重构实现了飞行与滚动两种模态之间的高效转换,显著拓展了系统的运动灵活性.目前,该系统已在模拟火星地形环境中完成多轮功能验证,显示出在外星探测任务中的应用潜力.

与异构式机器人系统相比,同构式系统具有模

块一致性,显著降低了对接几何约束与接口匹配复杂度,使对接过程更易实现标准化与自动化,同时也为群体层面的统一动力学建模与分布式控制奠定了基础.然而,其性能高度依赖群体通信可靠性与重构决策算法的稳定性,在模块失效、通信延迟及大规模重构条件下,系统整体鲁棒性仍面临挑战.未来研究需聚焦于群体层面的统一建模与分布式协同控制,实现大规模模块的自主重构与任务自组织分配,提升通信受限、节点失效等复杂条件下的系统鲁棒性与群体智能水平.

2 陆空多模态机器人关键技术分析

陆空多模态机器人在执行复杂任务过程中,通常需要经历陆地移动、起飞、飞行与着陆等多个运动阶段,各阶段普遍面临环境高度不确定、系统动力学强非线性及多重约束耦合等问题,导致动力学模型难以精确构建,且控制系统难以同时兼顾鲁棒性、自适应性与实时计算性能.然而,不同运动阶段所对应的环境交互方式及约束条件存在显著差异,使得上述问题在各阶段呈现出不同的技术侧重.基于此,陆空多模态机器人关键技术按运动阶段可划分为复杂地形下的障碍感知与稳定移动、非结构化环境中的自主稳定起飞、气流扰动下的稳定飞行与轨迹保持以及地面效应与触地冲击下的缓冲着陆,如图8所示.

2.1 复杂地形下的障碍感知与稳定移动

由于景物不规则、地形不确定以及光照变化大,陆空多模态机器人难以全面准确地实现对周围环境的感知与理解,导致其地面移动受阻、任务执行效率下降;非结构化地形下支撑面参数时变且难以精确建模,传统基于固定模型的控制算法难以保障陆空多模态机器人在移动过程中的稳定性.复杂地形下的障碍感知与稳定移动,是保证陆空多模态机器人地面作业成功的关键,也是后续陆空模态稳定转换的基础,主要包含非结构化环境中的障碍感知与



图 8 陆空多模态机器人关键技术

Fig.8 Key technologies for terrestrial-aerial multimodal robots

场景理解以及复杂地形下的稳定移动控制。

2.1.1 非结构化环境中的障碍感知与场景理解

陆空多模态机器人在非结构化环境中运动时, 面临环境噪声强、视场受限等问题, 单一传感器存在感知盲区且数据维度有限, 易产生障碍物误检与漏检, 难以形成对任务场景的完整感知; 尺度不变特征转换 (scale-invariant feature transform, SIFT)^[62] 以及随机采样一致 (random sample consensus, RANSAC)^[63] 等传统感知信息处理方法, 侧重于低层几何与纹理信息建模, 表达能力有限, 且对光照变化、遮挡及场景变化的鲁棒性与泛化能力不足, 难以表征环境中的语义信息, 影响机器人的运动安全性与任务执行效率^[64]。为提升复杂环境下

的感知完整性与场景理解可靠性, 现有研究通过多传感器融合实现多源信息互补与冗余校验, 并引入深度学习方法增强数据表征能力与环境语义理解能力, 如图 9 所示。

通过融合激光雷达、相机、红外、毫米波雷达以及惯性测量单元 (inertial measurement unit, IMU) 等多源异构传感器信息, 陆空多模态机器人能够在不同光照、气候及地形条件下实现感知信息互补, 有效弥补单一传感器在能见度、探测距离与抗干扰性能方面的不足, 实现对地形特征、障碍物分布及动态目标状态的高精度感知与稳定识别^[65-66]。针对纯视觉系统在高反射目标与复杂光照环境下易失效的问题, 魏慧等^[67] 提出一种轻量级融合方案,

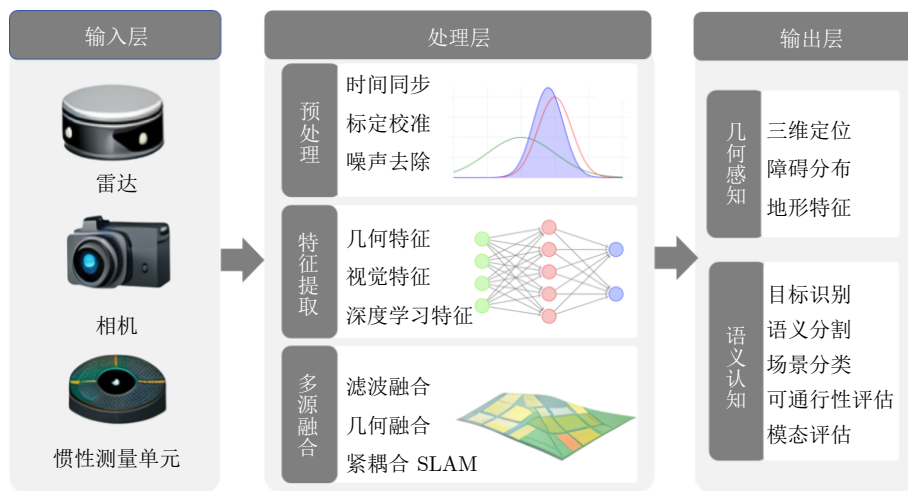


图 9 非结构化环境下的障碍感知与场景理解

Fig.9 Obstacle perception and scene understanding in unstructured environments

将微型激光传感器与视觉传感器结合,利用激光阵列不受光照干扰的优势,为机器人提供了稳定可靠的距离信息支撑.王超^[68]融合视觉、IMU与轮式里程计的同步定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)系统,通过误差卡尔曼滤波实现多源数据的紧耦合,有效抑制系统累积误差,解决了纹理缺失环境下机器人定位漂移与障碍感知不稳定问题.

在多传感器融合的基础上,深度学习算法能够从高噪声、不完整的原始感知数据中提取高判别性特征,进而显著提升陆空多模态机器人障碍感知与场景理解能力.Käslin等^[69]利用轻量级卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)对噪声较大的地形数据进行特征提取与可通行性评估,实现了对不可通行区域的可靠识别,显著提升了机器人在不规则地形中的环境建模精度.谢宇飞^[70]基于深度相机获取的深度图像,构建双分支CNN结构,一支用于输出运动方向概率,另一支用于判定地面运动模态,实现了从感知到决策的端到端映射,避免了复杂环境地图构建过程,显著提高了机器人的实时避障能力.肖朕^[71]进一步提出基于语义信息的实时感知方法,通过基于深度卷积神经网络的YOLOv4目标检测算法实现关键语义实体的精准识别,并融合深度信息提高三维定位精度,实现了从像素坐标到现实空间的语义目标定位,显著增强了陆空多模态机器人的环境认知能力.

2.1.2 复杂地形下的稳定移动控制

陆空多模态机器人在碎石地、山地等复杂地形中移动时,与地面构成以接触约束为主导的混合动力学系统,地面刚度与摩擦系数随运动状态显著变化且难以实时精确表征,接触反力难以作为确定性约束纳入控制建模,传统基于固定模型驱动的控制

框架难以保证机器人在陆地移动过程中的稳定性与控制性能^[72].

针对上述问题,研究人员在传统模型驱动控制框架的基础上,通过线性化设计或引入在线学习模块对模型误差进行补偿,以提升系统稳定性与控制精度.Pimentel等^[73]基于级联控制架构,将比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)控制与线性化动态反馈(dynamic feedback linearization, DFL)方法结合,通过输入-输出变换对系统非线性项进行补偿,使陆空多模态机器人在陆地移动过程中的姿态动力学在局部工作空间内实现了近似线性化与等效解耦,提高了其运动稳定性.Huang等^[74]在接触隐式模型预测控制(contact-implicit model predictive control, CI-MPC)框架中引入在线残差学习模块,使控制器能够根据实际动力学与先验模型误差实时在线调整混合接触模型,有效提升了机器人在接触模型时变下的陆地移动稳定性.

然而,该类方法对动力学建模精度与在线计算能力要求较高,在复杂地形条件下,当环境参数快速变化、接触行为呈现强非线性特征时,难以保障控制精度^[75].研究人员引入数据驱动控制方法,从数据中学习环境特征与系统动态响应之间的映射关系,对模型驱动控制框架形成有效补充,从而提升陆空多模态机器人在复杂环境中的稳定移动能力^[76],如图10所示.Xu等^[77]提出基于物理启发的数据驱动控制方法,通过引入基于通道分离注意力机制的深度神经网络,学习地形变化与姿态扰动之间的映射关系,以数据驱动方式替代部分动力学建模,实现对未建模扰动的预测与补偿,在此基础上将网络输出嵌入滑模控制框架,利用滑模控制抑制残余动态误差,在复杂地形下表现出优异的适应性与跨场景

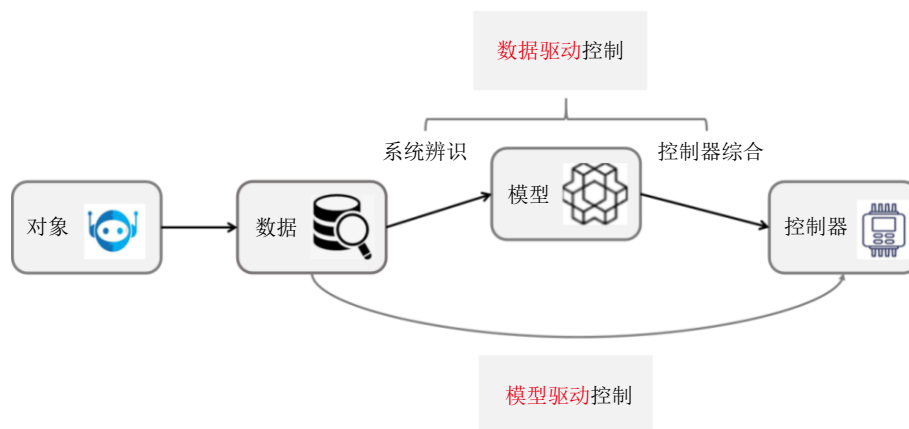


图 10 陆空多模态机器人陆地移动控制

Fig. 10 Land locomotion control of terrestrial-aerial multimodal robots

泛化能力。

复杂地形下的障碍感知与稳定移动相关研究如表 4 所示。针对非结构化环境中噪声强、视野受限,且接触面参数时变、难以精确建模的问题,陆空多模态机器人通过多传感器融合与深度学习增强实现了多源感知信息的互补融合与精确的语义表征;在模型驱动控制框架下引入误差补偿机制,或采用数据驱动方法替代部分动力学建模,实现了对模型不确定性与未建模动态的有效补偿,提升了复杂地形下机器人的移动稳定性。然而,CNN 等深度学习算法在动态环境中仍面临时序一致性不足、特征漂移及对遮挡与强噪声鲁棒性有限等问题,导致感知结果不稳定;数据驱动控制方法存在算法泛化能力有限、对大规模高质量数据依赖较强以及计算资源占用较高等问题。未来研究可进一步发展轻量化感知算法,结合自监督学习与多模态融合技术提升数据利用效率,加强仿真到现实的迁移研究,提升数据驱动方法在真实场景中的泛化能力与可靠性,最终实现陆空多模态机器人在复杂陆地环境中的稳定移动。

2.2 非结构化环境中的自主稳定起飞

废墟、山地、森林等区域地形起伏大,陆空多模态机器人起飞距离有限,难以获取足够的初始速度,传统起飞方式受到限制。此外,地形起伏使机器人初始姿态显著偏离基于水平地面假设建立的控制平衡点,增加了起飞姿态与推力精准控制的难度。非结构化环境中的自主稳定起飞技术是陆空多模态机器人在倾斜、不规则地形中实现地面模态向飞行模态平稳转换的核心,是后续稳定飞行的前提,主要包含基于生物启发的自主起飞策略以及非平衡初始条件下的起飞姿态控制。

2.2.1 基于生物启发的起飞运动策略

旋翼式陆空多模态机器人通过调节旋翼转速产生垂直升力,可在不同地形下实现自主起飞;扑翼式陆空多模态机器人起飞阶段推力密度有限,常需依赖奔跑积累空速,对起飞空间与地面条件要求较

高,在非结构化环境中起飞成功率低且姿态稳定性不足^[78]。自然界生物在不同非结构化环境中演化出多种起飞策略,受此启发,研究者提出了跳跃起飞、滑翔起飞与垂直起飞等多种仿生方案。

鸽子等鸟类可以通过跳跃获得起飞加速度,从而快速升空,如图 11(a) 所示。生物学研究表明,斑马雀和欧洲椋鸟分别可通过跳跃获得约 90% 和 95% 的起飞加速度。受此启发,Shin 等^[79]设计仿生陆空多模态机器人 RAVEN,如图 11(d) 所示。在机器人踝关节嵌入扭簧储存能量,起跳时腿部伸展并瞬时释放能量,同时启动螺旋桨进一步提供推力并稳定姿态。实验结果显示,跳跃-螺旋桨协同起飞机制可使 RAVEN 机器人在 0.17 s 内达到 2.4 m/s 的起飞速度与 0.4 m 的离地高度,实现快速起飞。

除了跳跃起飞,鸟类还会栖息在树枝、屋顶等高处,通过滑翔实现栖息和飞行之间的模态转换^[80],如图 11(b) 所示。Boria 等^[81]基于这一策略开发 MMALV 机器人,如图 11(e) 所示。可在建筑物屋顶边缘利用重力俯冲并结合螺旋桨辅助加速,使机翼在获得足够升力后过渡至飞行模态。

此外,蜂鸟可以直接通过翅膀的高频、大角度扑动以及翅膀姿态的精准控制来产生垂直方向的升力,如图 11(c) 所示,这种垂直起飞策略在空间有限的环境中展现出独特优势^[82]。通过模仿蜂鸟的起飞原理,Tu 等^[83]设计微型飞爬机器人,如图 11(f) 所示。在起飞阶段,其扑翼猛拍地面产生反作用力,结合不对称起落架及机身重心偏移设计,实现从水平到垂直的瞬时翻转,随后扑翼在空中高速拍动提供持续升力,支撑机器人以垂直向上姿态升空。然而,这种起飞方式要求扑翼高频拍打以获得足够升力,在大型机器人中容易引起重心偏移。

2.2.2 非平衡初始条件下的起飞姿态控制

废墟、山地、森林等非结构化环境地形起伏大且障碍物密集,地形起伏和支撑不均使陆空多模态机器人初始姿态偏离基于水平地面假设建立的控制平衡点,基于局部线性化的控制方法所能覆盖的稳

表 4 复杂地形下的障碍感知与稳定移动相关研究

Table 4 Research on obstacle perception and stable locomotion over complex terrains

运动环节	关键问题	技术内容	主要方法
陆地移动	非结构化环境中的障碍感知与场景理解	在地形多变、遮挡严重、噪声干扰强的条件下,通过多传感器融合与深度学习,实现对环境的全面感知、语义理解与精确建模	多源异构传感器轻量级融合 ^[67] 多传感器 SLAM 与紧耦合滤波 ^[68] 基于 CNN 的特征提取与可通行性评估 ^[69] 双分支神经网络结构 ^[70] 基于 YOLOv4 的语义感知与三维目标定位 ^[71]
	复杂地形下的稳定移动控制	针对复杂地形下支撑面刚度、摩擦等参数时变且难以精确建模的问题,融合模型驱动与数据驱动方法提高控制系统的稳定性、自适应性与鲁棒性	比例-积分-微分控制 + 线性化动态反馈 ^[73] 接触隐式模型预测控制结合在线残差学习 ^[74] 结合神经网络的数据驱动控制 ^[76-77]



图 11 基于生物启发的起飞策略

Fig.11 Bio-inspired takeoff strategies

定域被压缩^[84]. 同时, 重力偏置与升力分布不对称在机体上引入与姿态状态强耦合的非对称力矩, 基于解耦设计的传统控制律难以实现快速稳定的姿态补偿^[85].

针对上述问题, 现有研究从规划层、执行层和反馈层等多个层面展开研究. 在规划层, 通过对起飞轨迹进行前置优化设计, 在满足系统动力学约束与输入约束的前提下, 引导系统状态逐步进入控制器的稳定工作区间, 从而降低初始偏置对闭环稳定性的影响. Sihite 等^[54]将多模态概率路图 (multimodal probabilistic road map, MM-PRM) 与 A* 算法相结合, 通过对感知到的地形特征进行概率化建模生成多条候选起飞轨迹, 依据可通行性与安全性准则选取最优路径. 在此基础上, 采用直接配置法进行非线性动态规划优化, 实现对控制输入的全局协调调整, 从而在起飞前约束可行状态空间, 降低地面不平引起的姿态偏移. 在执行层, 针对系统内部耦合效应显著的问题, 通过推力矢量控制等手段, 对输入-力矩映射关系进行调整, 从动力学层面降低耦合影响并扩大系统可控空间. Li 等^[86]将推力矢量控制 (thrust vector control, TVC) 引入 Jet-HR2 陆空多模态机器人, 实现脚部风扇俯仰角的实时调节, 从而改变推力矢量方向. 在推重比仅为 1.17 的条件下, 机器人仍可实现超过 1 m 的平稳升空,

在低推重比工况下提升了起飞姿态稳定性. 在反馈层, 针对模型不确定性与外部扰动问题, 引入自适应控制算法进行在线补偿, 从而提升系统在复杂环境下的鲁棒性与适应能力. Zhu 等^[87]针对起飞过程中地形倾斜与近地气流扰动引起的模型失配问题, 提出基于 L_1 自适应控制的稳定性增强控制 (stability augmentation control, SAC) 方法, 通过引入增强状态预测器与低通滤波自适应律, 在存在扰动及模型不确定性条件下, 在线补偿由坡度变化、重心偏移及近地气流扰动引起的姿态偏转, 使机器人在 20° 斜坡条件下实现了零翻滚、零失稳的起飞.

非结构化环境中的自主稳定起飞研究内容如表 5 所示, 废墟、山地、森林等工作环境地形起伏大, 传统滑跑起飞策略受限且机器人起飞时初始姿态偏离控制平衡点. 为实现不同地形下的自主起飞, 陆空多模态机器人采用跳跃、滑翔与垂直起飞等多种策略; 为在非平衡初始条件下稳定起飞, 研究从前置轨迹规划、动力学解耦与自适应补偿等角度着手, 提升机器人起飞过程的稳定性与鲁棒性. 然而, 仿生起飞策略通常依赖特定结构与场景设计, 通用性较差; 轨迹规划对未知地形实时性不足; 陆空多模态机器人动力学强耦合且非线性显著, 精确解耦控制难以实现; 自适应控制参数收敛速度慢、瞬时性能受限. 未来需进一步结合多种仿生起飞策略,

表 5 非结构化环境中的自主稳定起飞相关研究
Table 5 Research on autonomous and stable takeoff in unstructured environments

运动环节	关键问题	技术内容	主要方法
起飞	基于生物启发的起飞运动策略	模仿生物的跳跃、滑翔、垂直起飞机理, 实现扑翼式陆空多模态机器人在不同地形下的自主高效起飞	跳跃起飞 ^[79] 滑翔起飞 ^[81] 垂直起飞 ^[83]
	非平衡初始条件下的起飞姿态控制	在缺乏精确环境信息、地形不规则且推力耦合的情况下, 基于多模态概率路图生成最优起飞轨迹, TVC 控制实现推力矢量调节, 自适应控制在线补偿姿态误差, 从而在倾斜地形下稳定起飞	多模态概率路图 + A* 算法 ^[64] 推力矢量控制 ^[86] 基于 L_1 自适应控制的稳定增强控制 ^[87]

提高其在不同地形下的泛用性, 同时结合学习型控制方法提升系统对初始姿态偏差与动力学不确定性的补偿能力, 最终实现陆空多模态机器人在非结构化环境中的自主稳定起飞。

2.3 气流扰动下的稳定飞行与轨迹保持

陆空多模态机器人在飞行过程中易受强风与突风影响, 传统机翼设计缺乏柔顺调节能力, 易出现气流分离、翼面抖动现象, 导致机器人飞行稳定性与续航性能下降。此外, 突风与湍流会改变局部气动载荷分布, 使机器人在飞行过程中出现姿态偏转与轨迹偏移。气流扰动下的飞行姿态稳定与轨迹保持是确保陆空多模态机器人按规划路径稳定执行任务的必要条件, 主要包含基于仿生气动机制的飞行稳定性提升和强风突风干扰下的姿态与轨迹调控。

2.3.1 基于仿生气动机制的飞行稳定性提升

受复杂气流扰动影响, 陆空多模态机器人在飞行过程中易出现姿态振荡、升力衰减及气动效率下降等问题。而自然界中的飞鼠、蝗虫及甲虫等生物通过柔性翼膜调控、被动减振和气动耦合能够实现稳定飞行。研究人员借鉴这些生物特性, 通过仿生结构设计, 有效提升了机器人的飞行稳定性和续航性能。

飞鼠能够通过连接前肢与后肢的柔性翼膜实现高效滑翔, 其特殊形态的翼尖能够削弱涡流阻力, 而翼膜边缘增厚的肌肉束则能起到减震作用, 进

而有效抑制飞行过程中的翼膜波动并减少能量损失^[88], 如图 12(a) 所示。受此启发, Shin 等^[44]在陆空多模态机器人中采用硅胶柔性翼膜, 引入被动翼尖设计削弱飞行阻力, 同时在翼膜边缘设计弹性绳结构模拟肌肉束的减振功能, 使机器人实现了平均滑翔比为 1.88 的稳定滑翔。蝗虫在跳跃顶点迅速展开后翅形成大面积气动表面, 通过空气阻尼在极短时间内抑制并消除跳跃起飞产生的俯仰或翻滚角速度, 从而建立稳定的滑翔姿态, 如图 12(b) 所示。Beck 等^[89]仿照蝗虫设计陆空多模态机器人, 其在跳跃轨迹顶点展开由碳纤维杆支撑的尼龙翼膜形成有效气动表面, 并利用梯形尾翼在不同攻角下产生差异化气动扭矩, 抵消跳跃带来的旋转角速度, 实现跳跃后的姿态稳定过渡。甲虫的鞘翅在飞行中通过与后翅形成气动耦合效应, 能够稳定前缘涡并抑制气流分离, 从而提高临界失速攻角, 提高飞行的升力产生效率和稳定性^[90], 如图 12(c) 所示。Vourtsis 等^[48]据此原理提出一种采用仿生双翼构型的仿甲虫机器人, 该机器人的鞘翅与后翅协同工作, 通过精确调节鞘翅的安装角和上反角, 不仅能为机器人提供额外升力, 还能有效抑制气流分离, 将机器人的失速攻角从无鞘翅时的 14° 提高至 20° , 显著提升了其飞行稳定性。

2.3.2 强风突风干扰下的姿态与轨迹调控

在强风与突风等外部扰动作用下, 陆空多模态机器人飞行气动参数随时间快速变化, 升力与姿态

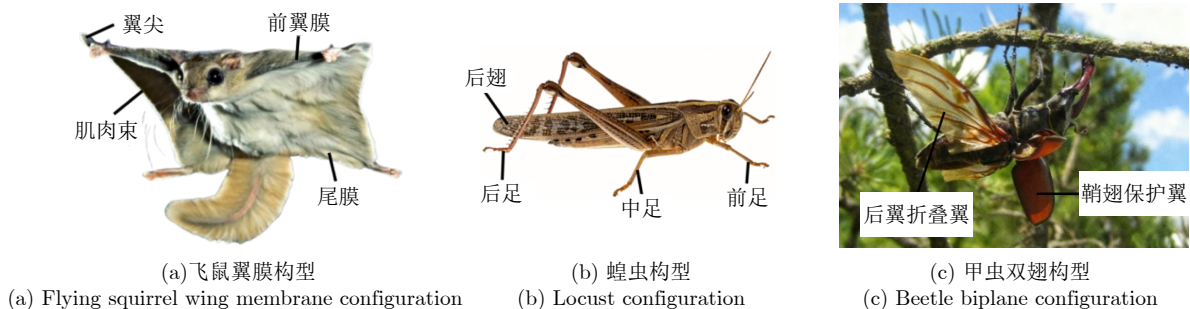


图 12 生物稳定飞行机制

Fig. 12 Biological mechanisms for stable flight

力矩呈现时变特性. 同时, 风场以加性扰动形式直接作用于系统动力学, 基于固定参数模型设计的控制律难以维持闭环稳定性^[91].

Qin 等^[92]采用线性二次型 (linear quadratic, LQ) 最优控制方法, 在非线性动力学模型基础上进行局部线性化, 并通过求解黎卡提方程获得最优反馈增益, 实现对滚转、俯仰与偏航多自由度的协同调节, 在中等风扰动条件下将姿态误差控制在 2° 以内. 该类方法本质上依赖模型近似有效的前提, 当风场快速变化导致线性化误差累积时, 闭环稳定裕度显著下降. 为提升系统对快速变化风场的适应能力, Fan 等^[93]提出自适应稳定性增强控制器 (adaptive stability augmentation controller, ASA), 以状态预测器为核心, 通过系统输出实时估计风扰动等不确定性项, 并结合投影型自适应律与低通滤波器在线生成补偿控制量. 在不依赖精确风场模型的情况下提升系统对扰动变化的适应能力, 在快速变化的风场中仍能够保持轨迹跟踪稳定性. 然而, 自适应控制参数更新速率受限于系统激励与稳定性约束, 当扰动变化频率超过参数更新能力时, 补偿效果衰减. 为提升对快速时变扰动的主动调节能力, 研究人员通过对扰动进行前瞻预测提升控制系统的鲁棒性. Olivares^[94]的研究表明, 融合系统结构信息与预测能力的基于模型的强化学习方法, 在随机湍流与阵风条件下的控制效果显著优于传统自适应控制. Chang 等^[95]将生成对抗网络 (generative adversarial network, GAN) 与非线性模型预测控制 (nonlinear model predictive control, NMPC) 相结合, 通过离线训练 GAN 构建风场预测模型, 并将预测结果引入 NMPC 优化过程, 实现对未来扰动的前瞻性补偿, 在 12.1 m/s 强风环境下将轨迹误差稳定控制在 10 ~ 15 cm 范围内.

气流扰动下的稳定飞行与轨迹保持研究内容如表 6 所示. 陆空多模态机器人在飞行过程中易受强风与突风影响, 扰动性强, 且传统机翼设计缺乏柔顺调节能力, 导致其易出现姿态偏转与轨迹偏移等问题. 相关研究从结构设计与控制优化两方面展开: 一方面, 通过引入仿生翼、翅结构, 优化机器人机翼

设计, 提高其柔顺调节能力; 另一方面, 通过自适应控制实现扰动补偿, 或利用预测控制实现主动调节. 然而, 仿生翼结构参数难以精确建模, 控制系统设计难度大; 自适应控制在强时变扰动条件下存在响应滞后的问题, 预测控制对模型精度依赖较强. 当前, 多数研究仍停留在风洞或简化扰动环境验证阶段, 真实复杂气象条件下的长期稳定性与可靠性有待研究. 未来研究可围绕气动机理建模与控制协同设计, 构建兼顾鲁棒性与适应性的飞行控制框架, 加强复杂气流环境下的实机验证, 提升系统在多扰动场景中的稳定飞行与轨迹保持能力.

2.4 地面效应与触地冲击下的缓冲着陆

陆空多模态机器人在着陆前的近地飞行阶段, 地面会阻碍诱导气流的扩散并引发气动干扰流场, 从而产生地面效应; 在着陆瞬间, 机体受力由单一气动力突变为气动力与地面反作用力的共同作用, 进一步导致机器人着陆姿态偏转^[96]. 此外, 触地冲击可能导致机器人晃动、倾覆, 甚至瞬时失效. 地面效应与触地冲击下的缓冲着陆是陆空多模态机器人从空中飞行向地面行驶过渡的关键环节, 主要包含地面效应下的动力学建模与控制以及着陆缓冲结构设计, 相关研究内容如表 7 所示.

2.4.1 地面效应下的动力学建模与控制

在着陆阶段, 随着飞行高度降低, 机翼气流与地面间的相互作用显著增强, 气动力系数快速变化, 系统动力学呈现强非线性与时变特性. 对于旋翼构型陆空多模态机器人, 地面效应主要来源于旋翼下洗气流与地面的相互作用, 表现为诱导速度减小及等效推力增益增加^[97-98], 如图 13(b) 所示, 具有可参数化特征. Wei 等^[99]在耦合动力学模型中引入等效地面效应模型 (equivalent ground effect model, EGEM), 揭示地面效应随机器人高度与前进速度变化的规律, 从而将地面效应转化为可预测、可补偿的动力学项, 在控制律中以前馈形式抵消地面效应引起的扰动. 在此基础上, Mandralis 等^[100]进一步揭示了地面效应与机体倾角之间的耦合关系, 并将该耦合关系作为可利用的控制增益引入自适应

表 6 气流扰动下的稳定飞行与轨迹保持相关研究

Table 6 Research on stable flight and trajectory maintenance under airflow disturbances

运动环节	关键问题	技术内容	主要方法
飞行	基于仿生气动机制的飞行稳定性提升	模仿飞鼠柔性翼膜、蝗虫可折叠后翅、甲虫气动耦合双翅等设计气动仿生结构, 提升陆空多模态机器人飞行稳定性和续航能力	仿飞鼠柔性翼 ^[44] 仿蝗虫折叠翼 ^[69] 仿甲虫双翅设计 ^[57]
	强风突风干扰下的姿态与轨迹调控	针对飞行过程中的强风突风干扰导致机器人姿态失稳、轨迹偏移的问题, 基于最优控制、自适应控制或预测控制, 实现非线性风扰的补偿和前瞻反馈	基于线性二次型的最优控制 ^[92] 自适应稳定增强控制 ^[93] 生成对抗网络 + 非线性模型预测控制 ^[95]

表 7 地面效应与触地冲击下的缓冲着陆相关研究
Table 7 Research on buffered landing under ground effect and touchdown impact

运动环节	关键问题	技术内容	主要方法
地面效应下的动力学建模与控制		着陆前的近地飞行阶段存在地面效应, 通过精确的动力学建模与先进控制算法, 实现稳定、柔顺且具备扰动抑制的着陆控制	等效地面效应模型建模与前馈补偿 ^[99] 自适应模型预测控制 ^[100] 基于在线参数估计的自适应控制 ^[101]
着陆	着陆缓冲结构设计	针对着陆瞬间的强冲击载荷, 设计 M 型悬架、弹性笼、仿生弹性腿、仿生滑翔翼、仿生尾巴, 实现冲击能量的高效吸收与着陆后的自扶正, 为后续陆地移动奠定基础	M 型悬架 ^[102] 弹性笼 ^[103] 仿生弹性腿 ^[104] 仿生翼 ^[89, 105] 仿生尾巴 ^[106]

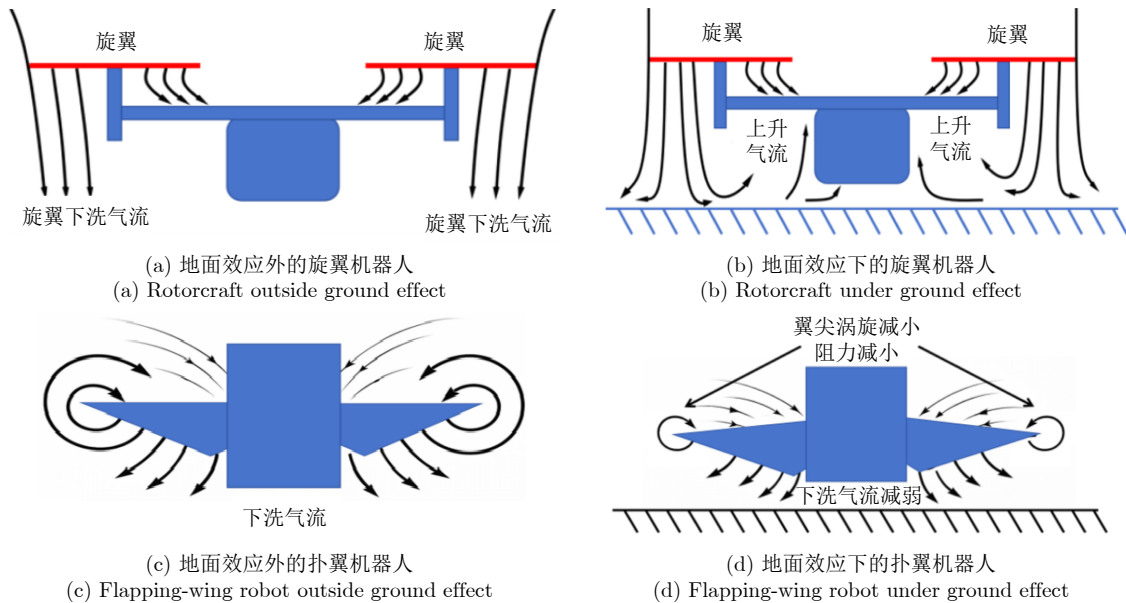


图 13 地面效应对陆空多模态机器人的影响

Fig. 13 Impact of ground effect on terrestrial-aerial multimodal robots

模型预测控制器, 当机器人以较大倾角接近地面时, 控制器主动利用地面效应带来的升力增益缓解推力不足导致的执行器饱和问题, 在不增加执行器数量与功率的前提下拓展了系统的稳定着陆边界。

与旋翼不同, 扑翼飞行依赖显著的非定常气动机制, 其气动力在拍动周期内呈强时变特性. 近地流场与扑翼尾迹的耦合使地面效应呈现出高度非线性且难以参数化建模的特征, 如图 13(d) 所示^[107], 基于模型的前馈补偿策略难以适用. Hyun 等^[101]设计了一种自适应跟踪控制器, 将地面效应引起的气动特性变化建模为未知但有界的不确定性扰动, 通过在线参数估计与基于误差反馈的控制律实现对地面效应的实时补偿. 实验结果表明, 该方法显著提高了微型扑翼陆空多模态机器人在着陆过程中的轨迹跟踪精度与控制稳定性。

2.4.2 着陆缓冲结构设计

陆空多模态机器人从飞行模态向陆地模态转换的过程中, 着陆冲击不可避免. 强烈的冲击载荷可

能导致陆空多模态机器人结构变形甚至瞬时失效, 此外, 冲击引发的机体晃动和姿态失稳, 容易导致陆空多模态机器人倾倒, 影响后续的陆地移动^[108].

部分轮式陆空多模态机器人借鉴传统汽车悬架设计, 利用弹性元件吸收冲击, 并通过阻尼元件抑制振动. Choi 等^[102]设计的 BAXTER 陆空多模态机器人, 通过 M 型悬架实现缓冲, 如图 14(a) 所示. 该悬架采用类似 M 形状的双摆臂设计, 在关节处集成弹簧与阻尼元件, 当机器人着陆时, 冲击力通过车轮传递至摆臂, 使其绕关节旋转并压缩弹簧, 从而将瞬间冲击动能转化为弹性势能, 能够显著降低峰值冲击力并延长缓冲时间。

自然界中生物在亿万年进化中形成的多种高效缓冲机制, 也为陆空多模态机器人的着陆缓冲提供了重要启示. 龟壳通常具有拱形曲面构型与较低整体重心, 当倾倒时, 壳体与地面接触所形成的几何约束在重力作用下产生姿态回复力矩, 实现被动自扶正. Yang 等^[103]设计的陆空多模态机器人借鉴海

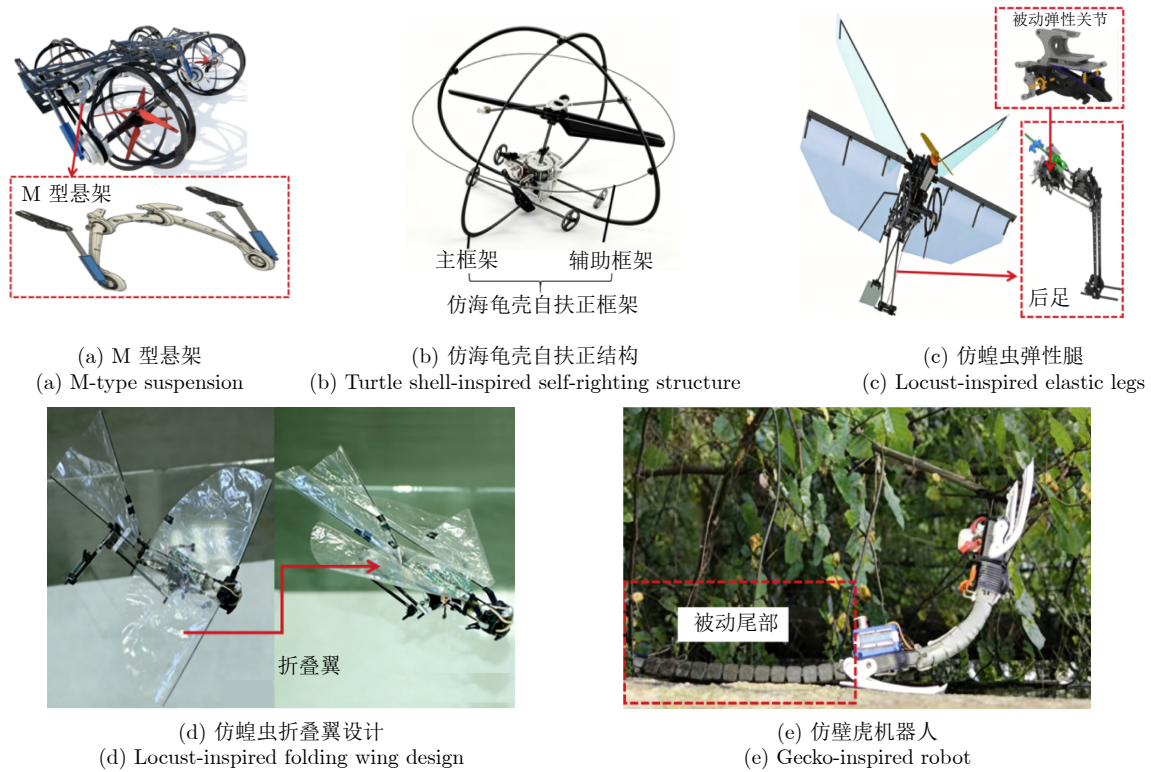


图 14 陆空多模态机器人着陆阶段缓冲设计

Fig. 14 Buffer design for landing stage of terrestrial-aerial multimodal robots

龟壳的结构,如图 14(b)所示.在着陆过程中,笼架通过弹性形变吸收并耗散冲击能量,将部分动能转化为势能;随后通过电机反转驱动主旋翼产生反向推力,完成姿态复位,保证了着陆过程的稳定性.蝗虫、跳蚤和沫蝉等昆虫的腿部结构经过长期进化,具备优异的缓冲能力^[109],其腿部关节处的肌肉在着陆瞬间发生弹性形变,通过被动拉伸与压缩将动能转化为弹性势能,并经由肌腱等组织逐步释放,从而实现有效缓冲与能量回收. Xu 等^[104]设计的 LocustBot 机器人模仿蝗虫腿部的缓冲机制,设计被动弹性关节,如图 14(c)所示.通过关节形变吸收着陆冲击能量,降低着陆时的冲击载荷,防止机器人失稳.

生物常利用空气动力学机制来实现滑翔着陆缓冲,飞鼠在着陆前会充分展开连接四肢的宽大皮膜,利用空气阻力将垂直下落速度降至极低水平^[110];猎隼在着陆时会将翅膀展开成高攻角状态,并将尾羽扇形展开以增加阻力,利用产生的湍流进一步耗散动能^[111],从而实现缓冲着陆. Vidyasagar 等^[105]对比了拆除机翼和安装滑翔翼的机器人性能,发现安装滑翔翼的机器人水平飞行距离提升了 123%,着陆冲击能量降低了 54%,首次证明了滑翔翼在陆空多模态机器人着陆缓冲中的重要作用. Beck 等^[89]设计

仿沙漠蝗虫机器人,如图 14(d)所示.对比固定翼与折叠翼两种陆空多模态机器人构型,与固定翼相比,折叠翼使机器人着陆速度由 6.00 m/s 降至 4.84 m/s,冲击力减少 20%,且着陆后反弹高度更低,证明了折叠翼在实现高效、平稳着陆方面的优越性.尾巴在生物的着陆过程中也发挥着关键作用,滑翔壁虎通过尾巴在着陆时产生反向力矩,有效抵消头部撞击树干带来的俯仰角动量^[112]. Siddall 等^[106]基于这一机制设计仿壁虎机器人,如图 14(e)所示,并测试了不同尾长对机器人着陆性能的影响.实验表明,有尾机器人的着陆成功率远高于无尾机器人,且尾部越长,着陆成功率越高,有效验证了尾部在提升陆空多模态机器人着陆稳定性方面的关键作用.

陆空多模态机器人在着陆前存在地面效应,旋翼陆空多模态机器人对此进行精确建模,并进行前馈补偿,扑翼陆空多模态机器人则通过在线估计与误差反馈对地面效应进行补偿,有效避免了地面效应的干扰.然而,现有研究将地面效应与触地过程分离,缺乏对气动参数变化与接触约束突变耦合条件下系统稳定性的统一理论分析.未来研究亟须从混合系统控制理论出发,构建涵盖气动时变动力学与接触切换过程的统一模型,进而实现对近地流场与接触状态的联合估计,进一步提升着陆可靠性.

此外, 在着陆瞬间存在强冲击载荷, 研究人员设计 M 型悬架、弹性笼、仿生弹性腿等多种仿生结构, 实现了冲击能量的高效吸收与自扶正. 未来可进一步从多尺度仿生结构设计、被动与主动缓冲机制的协同优化等方向展开, 以实现安全稳定着陆.

3 陆空多模态机器人挑战及发展方向

陆空多模态机器人融合了地面移动与空中飞行能力, 在复杂环境中展现出较强的环境适应能力, 已成为智能机器人领域的重要研究方向. 围绕地面移动、起飞、飞行与着陆等运动阶段的关键技术, 相关研究从感知、设计、控制等多个角度出发, 为陆空多模态机器人在复杂环境中的连续任务执行提供了重要支撑. 在地面移动阶段, 通过多传感器融合与深度学习实现了场景语义理解, 通过误差补偿和数据驱动实现了稳定移动控制; 在起飞阶段, 提出跳跃、滑翔、垂直起飞等多种仿生策略, 并结合轨迹规划与自适应控制提升了起飞稳定性; 在飞行阶段, 通过仿生机翼设计与自适应、预测控制方法增强了抗扰动能力; 在着陆阶段, 通过地面效应补偿与仿生缓冲结构设计提升了着陆安全性.

虽然当前陆空多模态机器人在跨域运动方面已取得一定进展, 但其环境适应性与任务执行效率和自然界具备多模态运动能力的生物相比尚有差距. 一方面, 尚缺乏能够统一描述不同运动模式及其转换过程的动力学模型框架, 难以精确描述构型变化与动力学演化的映射关系; 另一方面, 感知、决策与

控制模块仍以分层式设计为主, 难以实现目标精准感知与机器人灵活运动之间的协同闭环优化. 现有结构多以刚性为主, 在复杂地形交互与高频模态转换过程中顺应性不足, 制约了机器人的环境适应能力.

为解决上述挑战, 提升陆空多模态机器人在任务执行过程中的自主化与智能化水平, 其研究亟须在以下方面进一步突破 (见图 15): 一是跨模态统一建模, 构建能够描述不同运动模式及其转换过程的统一动力学框架; 二是智能感控一体化设计, 通过学习实现感知、决策与控制的协同优化, 提升系统整体鲁棒性与实时响应能力; 三是轻量化柔性设计, 引入新型材料与多功能结构, 提高机器人顺应性.

3.1 跨模态统一建模

陆空多模态机器人在不同运动模式下, 其结构构型、动力学特性等方面存在显著差异, 在模态转换过程中, 系统动力学与可行动作空间易发生突变, 传统的拉格朗日、牛顿-欧拉等建模方法难以在全模态范围内构建统一精确的系统模型^[113]. 现有研究通常针对不同模态分别构建独立的动力学模型, 并依赖基于规则的调度机制实现模态转换. 然而, 该类方法缺乏统一的系统建模与语义表示框架, 难以构建机器人不同运动模式之间的内在关联及动作映射关系, 导致机器人在模态转换过程中决策一致性不足、动作连续性受限, 制约了其整体智能水平与复杂任务执行能力. 针对上述问题, 数据驱动的跨模态统一建模方法逐渐成为重要发展方向, 利用数

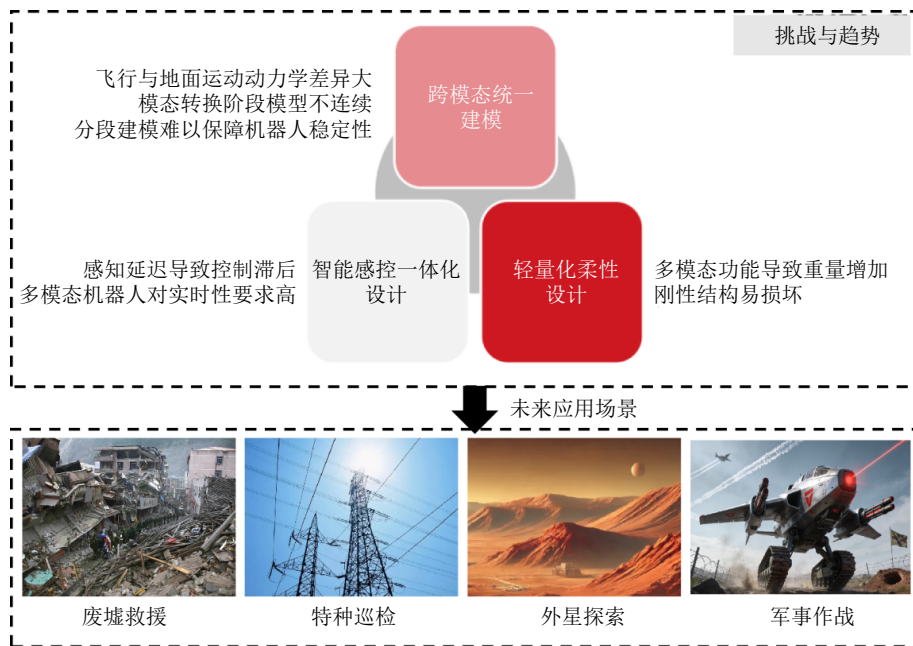


图 15 陆空多模态机器人挑战及发展方向

Fig. 15 Challenges and development direction of terrestrial-aerial multimodal robots

据驱动方法从跨模态运动数据中联合学习统一的状态表示与系统演化规律,将机器人在不同模式下的几何结构参数、动力学约束及运动能力边界等信息,以条件变量形式嵌入可学习的状态表征与动力学模型中,从而构建系统在不同形态参数条件下的统一描述方法,进而实现对不同运动模态的整体建模.在方法层面,可结合世界模型^[114]、结构化潜变量模型^[115]及图神经网络^[116]等数据驱动建模方法,从多模态交互数据中学习跨模态统一的系统动力学演化模型,实现对机器人在不同运动模态下行为规律的联合建模与统一预测.进一步地,通过引入跨模态对齐学习^[117]、多任务学习^[118]与元学习^[119]机制,在统一模型框架内实现快速模态适配与少样本迁移,从而提升陆空多模态机器人模型的泛化能力与持续学习能力.

3.2 智能感控一体化设计

陆空多模态机器人需具备快速完成环境感知、场景理解与动作决策的能力,以实现空中侦察与地面作业模态之间的高效转换,对系统的实时性、信息闭环效率及整体协同性提出了更高要求.然而,传统“感知-建模-决策-控制”串行架构通常依赖人工建模与模块化设计,各功能单元相对独立.其中,感知系统多以环境重建或通用特征提取为目标,难以围绕控制与决策需求进行自适应配置,易造成信息冗余或关键决策特征缺失;同时,基于固定模型的控制策略难以充分提取感知层蕴含的高维信息,限制了系统对复杂动态环境的适应能力.基于端到端的感控一体化设计方法在复杂环境建模与高维策略学习方面展现出较强潜力,逐渐成为陆空多模态机器人感知与控制的重要发展方向.一方面,可通过感知-行动协同学习^[120]、任务导向表征构建与策略感知融合等方法,将多模态传感信息映射到面向控制的低维状态表征,实现感知模型与控制策略的协同学习与联合优化,从而充分发挥数据驱动方法在复杂特征表征与非线性建模方面的优势,提升系统的稳定性;另一方面,引入强化学习与主动感知机制,使控制策略能够反向约束传感器调度与信息采集过程,在闭环中增强感知能力,实现以任务目标为导向的自适应感知与控制协同^[121].此外,在工程实现层面,仿真数据生成^[122]、自监督学习^[123]与模仿学习^[124]等技术已逐渐成为构建感控一体化系统的重要支撑.在此基础上,结合事件相机、神经形态传感器以及低时延计算与在线学习架构,有望构建具备高响应性与高鲁棒性的学习型感知-控制闭环系统,为陆空多模态机器人在高速动态环境中的稳

定运行提供重要支撑^[125].

3.3 轻量化柔性设计

陆空多模态机器人在运动过程中涉及飞行、着陆与陆地移动等多个环节,其结构既要满足空中飞行对轻量化的要求,又要具备在着陆冲击与障碍交互过程中的缓冲与适应能力.传统陆空多模态机器人多采用以刚性材料为主的结构体系,该类结构依靠高刚度对抗冲击,以在复杂环境中维持机器人系统稳定.然而,当机器人遭遇强起降冲击或突发外界扰动时,刚性结构往往将载荷直接传递至关节与执行机构,易导致冲击应力集中与结构疲劳累积,并引起系统稳定裕度下降,从而对材料性能与控制系统的实时调节能力提出更高要求.此外,增加材料刚性以提升抗冲击能力,往往伴随质量的增加,会削弱机器人飞行运动能力.基于智能柔性材料^[126]的轻量化设计思路利用柔性材料固有的能量吸收特性,对冲击载荷进行自动分散与吸收,降低机器人系统对高刚度设计与高精度控制的依赖.仿生柔性铰链借鉴昆虫腿部协同机制^[101],在起落架中引入弹性构件与柔性连接,使结构在着陆过程中产生可控形变,实现着陆过程中的能量吸收与载荷重分配,显著降低峰值冲击力,并抑制反弹与结构损伤,降低抗冲击结构质量.未来,随着柔性结构设计的不断发展与工程应用的深化,部分传统刚性结构有望逐步被柔性或刚柔耦合结构所替代,从而减少冗余承载构件,优化结构布局,并进一步提升系统的轻量化水平和机器人性能^[127].

4 结束语

陆空多模态机器人是实现跨域、高效自主作业的关键,研究自主化、智能化陆空多模态机器人有助于提升其在复杂环境中的任务适应性,以及执行灾害救援、野外巡检、外星探索等多样化任务的效率和安全性.本文综述了结构叠加式陆空多模态机器人、形态变构式陆空多模态机器人、组合分离式陆空多模态机器人的发展现状,阐述了不同陆空多模态机器人的构型特点、驱动方式及运动机理,分析了各类陆空多模态机器人的优缺点与应用场景,并对陆空多模态机器人复杂地形下的障碍感知与稳定移动、非结构化环境中的自主稳定起飞、气流扰动下的稳定飞行与轨迹保持以及地面效应与触地冲击下的缓冲着陆等关键技术进行了分析,最后针对陆空多模态机器人自主化与智能化发展需求,分析了陆空多模态机器人面临的挑战及发展方向,可为未来该领域的研究工作提供参考.

参考文献

- 1 Wang Y T, Chen W W, Luan T H, Su Z, Xu Q C, Li R D, et al. Task offloading for post-disaster rescue in unmanned aerial vehicles networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2022, **30**(4): 1525–1539
- 2 Tang C, Du B Y, Jiang S W, Dong X G, Liu X J, Zhao H C. A pipeline inspection robot for navigating tubular environments in the sub-centimeter scale. *Science Robotics*, 2022, **7**(66): Article No. eabm8597
- 3 Chien S A, Visentin G, Basich C. Exploring beyond Earth using space robotics. *Science Robotics*, 2024, **9**(91): Article No. eadi6424
- 4 Zhou X, Wen X Y, Wang Z P, Gao Y M, Li H J, Wang Q H, et al. Swarm of micro flying robots in the wild. *Science Robotics*, 2022, **7**(66): Article No. eabm5954
- 5 Zhang E Z, Sun R Y, Pang Z X, Liu S. Obstacle capability of an air-ground amphibious reconnaissance robot with a planetary wheel-leg type structure. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2021, **2021**: Article No. 7925707
- 6 Feng W W, Sun L, Jin Z K, Chen L L, Liu Y C, Xu H, et al. A large-strain and ultrahigh energy density dielectric elastomer for fast moving soft robot. *Nature Communications*, 2024, **15**(1): Article No. 4222
- 7 Haarnoja T, Moran B, Lever G, Huang S H, Tirumala D, Humplik J, et al. Learning agile soccer skills for a bipedal robot with deep reinforcement learning. *Science Robotics*, 2024, **9**(89): Article No. eadi8022
- 8 Liu H R, Tian H M, Wang D R, Yuan T F, Zhang J Y, Liu G F, et al. Electrically active smart adhesive for a perching-and-takeoff robot. *Science Advances*, 2023, **9**(43): Article No. eadj3133
- 9 Gao Liang, Gao Jing-Song, Xu Wei, Zhao Jie. Research status and development prospects of amphibious bionic robots. *Robot Industry*, 2023(4): 51–59
(高良, 高靖松, 许威, 赵杰. 两栖类仿生机器人研究现状及发展前景. 机器人产业, 2023(4): 51–59)
- 10 Liu C, Zhao J, Sun N Y. A review of collaborative air-ground robots research. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2022, **106**(3): Article No. 60
- 11 Ramirez J P, Hamaza S. Multimodal locomotion: Next generation aerial-terrestrial mobile robotics. *Advanced Intelligent Systems*, 2025, **7**(7): Article No. 2300327
- 12 Michelson R C. Entomopter and Method for Using Same, U.S. Patent 6082671A, July 2000
- 13 Kossett A, D'Sa R, Purvey J, Papanikolopoulos N. Design of an improved land/air miniature robot. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Anchorage, USA: IEEE, 2010. 632–637
- 14 Nagatani K, Akiyama K, Yamauchi G, Otsuka H, Nakamura T, Kiribayashi S, et al. Volcanic ash observation in active volcano areas using teleoperated mobile robots-introduction to our robotic-volcano-observation project and field experiments. In: Proceedings of the IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR). Linköping, Sweden: IEEE, 2013. 1–46
- 15 Huang Qiang, Meng Fei, Yu Zhang-Guo, Lin De-Fu, Xu Bin, Duo Ying-Xian. Development strategy for air-ground collaborative multi-modal intelligent robot system. *Strategic Study of CAE*, 2021, **23**(5): 116–121
(黄强, 孟非, 余张国, 林德福, 徐彬, 朵英贤. 陆空协同多模态智能机器人系统发展战略研究. 中国工程科学, 2021, **23**(5): 116–121)
- 16 Tagliavini L, Colucci G, Botta A, Cavallone P, Baglieri L, Quaglia G. Wheeled mobile robots: State of the art overview and kinematic comparison among three omnidirectional locomotion strategies. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2022, **106**(3): Article No. 57
- 17 Amertot S, Gebresenbet G, Alwan H M. Optimizing the performance of a wheeled mobile robots for use in agriculture using a linear-quadratic regulator. *Robotics and Autonomous Systems*, 2024, **174**: Article No. 104642
- 18 Page J R, Pounds P E I. The quadroller: Modeling of a UAV/UGV hybrid quadrotor. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Chicago, USA: IEEE, 2014. 4834–4841
- 19 Ootsuka M, Premachandra C, Kato K. Development of an air-ground operational robot and its fundamental controlling approach. In: Proceedings of the Joint 7th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS) and 15th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS). Kitakyushu, Japan: IEEE, 2014. 1470–1474
- 20 Mishra S, Patnaik K, Garrard Y, Chase Z, Ploughe M, Zhang W L. Ground trajectory control of an unmanned aerial-ground vehicle using thrust vectoring for precise grasping. In: Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Boston, USA: IEEE, 2020. 1270–1275
- 21 Li B B, Ma L, Wang D, Sun Y K. Driving and tilt-hovering-an agile and manoeuvrable aerial vehicle with tilttable rotors. *IET Cyber-Systems and Robotics*, 2021, **3**(2): 103–115
- 22 Zhang D X, Guo C, Ren H R, Zhu P M, Xu M, Lu H M. The design of an aerial/ground dual-modal mobile robot for exploring complex environments. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Real-Time Computing and Robotics (RCAR). Xining, China: IEEE, 2021. 393–398
- 23 Tanaka K, Zhang D, Inoue S, Kasai R, Yokoyama H, Shindo K, et al. A design of a small mobile robot with a hybrid locomotion mechanism of wheels and multi-rotors. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Takamatsu, Japan: IEEE, 2017. 1503–1508
- 24 Kalantari A, Touma T, Kim L, Jitosh R, Strickland K, Lopez B T, et al. Drivocopter: A concept hybrid aerial/ground vehicle for long-endurance mobility. In: Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. Big Sky, USA: IEEE, 2020. 1–10
- 25 Lee J, Bjelonic M, Reske A, Wellhausen L, Miki T, Hutter M. Learning robust autonomous navigation and locomotion for wheeled-legged robots. *Science Robotics*, 2024, **9**(89): Article No. eadi9641
- 26 Mizutani S, Okada Y, Salaan C J, Ishii T, Ohno K, Tadokoro S. Proposal and experimental validation of a design strategy for a UAV with a passive rotating spherical shell. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Hamburg, Germany: IEEE, 2015. 1271–1278
- 27 Kalantari A, Spenko M. Design and experimental validation of HyTAQ, a hybrid terrestrial and aerial quadrotor. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Karlsruhe, Germany: IEEE, 2013. 4445–4450
- 28 Kawasaki K, Zhao M J, Okada K, Inaba M. MUWA: Multi-field universal wheel for air-land vehicle with quad variable-pitch propellers. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Tokyo, Japan: IEEE, 2013. 1880–1885
- 29 Briod A, Kornatowski P, Zufferey J C, Floreano D. A collision-resilient flying robot. *Journal of Field Robotics*, 2014, **31**(4): 496–509
- 30 Guo Z Y, Zhu Y D, Li T, Wang M L, Xu L S, Wang Y C. Design and control research of a triphibious robot based on rotors. In: Proceedings of the IEEE 9th International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS). Bei-

- ing, China: IEEE, 2018. 454–459
- 31 Arm P, Waibel G, Preisig J, Tuna T, Zhou R Y, Bickel V, et al. Scientific exploration of challenging planetary analog environments with a team of legged robots. *Science Robotics*, 2023, **8**(80): Article No. eade9548
- 32 Mikolajczyk T, Mikolajewska E, Al-Shuka H F N, Malinowski T, Kłodowski A, Pimenov D Y, et al. Recent advances in bipedal walking robots: Review of gait, drive, sensors and control systems. *Sensors*, 2022, **22**(12): Article No. 4440
- 33 Kim K, Spieler P, Lupu E S, Ramezani A, Chung S J. A bipedal walking robot that can fly, slackline, and skateboard. *Science Robotics*, 2021, **6**(59): Article No. eabf8136
- 34 Paolino A, Nava G, di Natale F, Bergonti F, Vanteddu P R, Grassi D, et al. Learning aerodynamics for the control of flying humanoid robots. *Communications Engineering*, 2025, **4**(1): Article No. 111
- 35 Coelho J, Ribeiro F, Dias B, Lopes G, Flores P. Trends in the control of hexapod robots: A survey. *Robotics*, 2021, **10**(3): Article No. 100
- 36 Chen Y F, Wang H Q, Helbling E F, Jafferis N T, Zufferey R, Ong A, et al. A biologically inspired, flapping-wing, hybrid aerial-aquatic microrobot. *Science Robotics*, 2017, **2**(11): Article No. eaao5619
- 37 Chukewad Y M, James J, Singh A, Fuller S. RoboFly: An insect-sized robot with simplified fabrication that is capable of flight, ground, and water surface locomotion. *IEEE Transactions on Robotics*, 2021, **37**(6): 2025–2040
- 38 Zhao M J. Aerial grasping by multi-limbed flying robot SPIDAR based on vectored thrust control. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Atlanta, USA: IEEE, 2025. 5202–5208
- 39 Sui T T, Zou T. A review of bat-inspired shape morphing robotic design. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2022, **14**(5): Article No. 050801
- 40 Yeh S I, Chiang C H. The influence of wing membrane elasticity on aerodynamics in a bat-inspired flapping robot. *Biometrics*, 2025, **10**(3): Article No. 161
- 41 Kang J G, Lee D, Han S. A highly maneuverable flying squirrel drone with controllable foldable wings. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Detroit, USA: IEEE, 2023. 6652–6659
- 42 Woodward M A, Sitti M. MultiMo-Bat: A biologically inspired integrated jumping-gliding robot. *The International Journal of Robotics Research*, 2014, **33**(12): 1511–1529
- 43 Wang Han-Bin, He Xi, Wang Jin-Jun. Experimental study on aerodynamic and deformation characteristics of flexible membrane wing. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2022, **48**(4): 665–673
(王涵斌, 贺曦, 王晋军. 柔性翼气动力和变形特性的实验研究. 北京航空航天大学学报, 2022, **48**(4): 665–673)
- 44 Shin W D, Park J J, Park H W. Bio-inspired design of a gliding-walking multi-modal robot. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Madrid, Spain: IEEE, 2018. 8158–8164
- 45 Daler L, Lecoer J, Hählen P B, Floreano D. A flying robot with adaptive morphology for multi-modal locomotion. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Tokyo, Japan: IEEE, 2013. 1361–1366
- 46 Daler L, Mintchev S, Stefanini C, Floreano D. A bioinspired multi-modal flying and walking robot. *Bioinspiration & Biometrics*, 2015, **10**(1): Article No. 016005
- 47 Daler L. Adaptive Morphology for Multi-modal Locomotion [Ph.D. dissertation], École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland, 2015.
- 48 Vourtsis C, Stewart W, Floreano D. Robotic *elytra*: Insect-inspired protective wings for resilient and multi-modal drones. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, **7**(1): 223–230
- 49 Morton S, Papanikolopoulos N. A small hybrid ground-air vehicle concept. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Vancouver, Canada: IEEE, 2017. 5149–5154
- 50 Kossett A, Papanikolopoulos N. A robust miniature robot design for land/air hybrid locomotion. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Shanghai, China: IEEE, 2011. 4595–4600
- 51 Meiri N, Zarrouk D. Flying STAR, a hybrid crawling and flying sprawl tuned robot. In: Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Montreal, Canada: IEEE, 2019. 5302–5308
- 52 Zarrouk D, Yehezkel L. Rising STAR: A highly reconfigurable sprawl tuned robot. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, **3**(3): 1888–1895
- 53 David N B, Zarrouk D. Design and analysis of FCSTAR, a hybrid flying and climbing sprawl tuned robot. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, **6**(4): 6188–6195
- 54 Sihite E, Kalantari A, Nemovi R, Ramezani A, Gharib M. Multi-modal mobility morphobot (M4) with appendage repurposing for locomotion plasticity enhancement. *Nature Communications*, 2023, **14**(1): 3323
- 55 Fabris A, Aucone E, Mintchev S. Crash 2 squash: An autonomous drone for the traversal of narrow passageways. *Advanced Intelligent Systems*, 2022, **4**(11): Article No. 2200113
- 56 Tao Zi-Chen, Liu Song-Yuan, Gui Yun, Hao Si-Yuan, Fang Hao, Yang Qing-Kai. Design and control of tensegrity based cross-domain robot. *Robot*, 2025, **47**(3): 338–347
(陶子辰, 刘松源, 桂昀, 郝思远, 方浩, 杨庆凯. 张拉整体跨域机器人的设计与控制. 机器人, 2025, **47**(3): 338–347)
- 57 Xu S W, Hu X N, Yang R X, Zang C Q, Li L, Xiao Y, et al. Transforming machines capable of continuous 3D shape morphing and locking. *Nature Machine Intelligence*, 2025, **7**(5): 703–715
- 58 Latscha S, Kofron M, Stroffolino M, Davis L, Merritt G, Piccoli M, et al. Design of a hybrid exploration robot for air and land deployment (H.E.R.A.L.D) for urban search and rescue applications. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Chicago, USA: IEEE, 2014. 1868–1873
- 59 Deng L X, Yang B Q, Dong X, Cui Y J, Gao Y Z, Li D C, et al. Self-spin enabled docking and detaching of a UAV-UGV system for aerial-terrestrial amphibious and independent locomotion. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2023, **8**(5): 2454–2461
- 60 Miao J, Zhao M H. System design and research of land air amphibious robots. In: Proceedings of the 7th International Conference on Electronics Technology (ICET). Chengdu, China: IEEE, 2024. 613–617
- 61 Agha-Mohammadi A, Tagliabue A, Schneider S, Morrell B, Lunine J. The shapeshifter: A morphing, multi-agent, multi-modal robotic platform for the exploration of Titan. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2021. 12087–12094
- 62 Zhou F, Jiao Z K, Shen G Q, Xing M D, Gashinova M. A multi-angle MIMO-SAR fusion imaging method based on improved range migration algorithm and improved geographic information scale invariant feature transform algorithm. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2025, **18**: 13938–13949
- 63 Liang X X, Lin Y Q, Fu H Z, Zhu L, Li X M. RSCFed: Ran-

- dom sampling consensus federated semi-supervised learning. In: Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). New Orleans, USA: IEEE, 2022. 10144–10153
- 64 Díez-González J, Álvarez R, Prieto-Fernández N, Perez H. Local wireless sensor networks positioning reliability under sensor failure. *Sensors*, 2020, **20**(5): Article No. 1426
- 65 Xu X B, Zhang L, Yang J, Cao C F, Wang W, Ran Y Y, et al. A review of multi-sensor fusion SLAM systems based on 3D LIDAR. *Remote Sensing*, 2022, **14**(12): Article No. 2835
- 66 Wang X, Li K Q, Chehri A. Multi-sensor fusion technology for 3D object detection in autonomous driving: A review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2024, **25**(2): 1148–1165
- 67 Wei Hui, Zhang Bin, Huang Bo-Chao, Xu Hao-Tong, Luo Yang, Xu Nuo, et al. Multi-mode transformable land-air amphibious robot. *Robot*, 2025, **47**(3): 328–337
(魏慧, 张斌, 黄伯超, 徐浩桐, 罗杨, 许诺, 等. 陆空两栖多模态可变形机器人. *机器人*, 2025, **47**(3): 328–337)
- 68 Wang Chao. Research and Implementation of Land and Air Path Planning Algorithm Based on Multi-sensor Fusion SLAM [Master thesis], University of Electronic Science and Technology of China, China, 2023.
(王超. 基于多传感器融合 SLAM 的陆空路径规划算法研究与实现 [硕士学位论文], 电子科技大学, 中国, 2023.)
- 69 K slin R, Fankhauser P, Stumm E, Taylor Z, Mueggler E, Delmerico J, et al. Collaborative localization of aerial and ground robots through elevation maps. In: Proceedings of the IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR). Lausanne, Switzerland: IEEE, 2016. 284–290
- 70 Xie Yu-Fei. Design and Implementation of Ground Control System for Land-aerial Robots [Master thesis], Harbin Institute of Technology, China, 2023.
(谢宇飞. 陆空机器人地面控制系统的设计与实现 [硕士学位论文], 哈尔滨工业大学, 中国, 2023.)
- 71 Xiao Zhen. Research on Autonomous Exploration Algorithm for Land-air Amphibious Robots in Unknown Environments [Master thesis], Nanjing University of Science and Technology, China, 2023.
(肖朕. 陆空两栖机器人未知环境下自主探索算法研究 [硕士学位论文], 南京理工大学, 中国, 2023.)
- 72 le Cleac'h S, Howell T A, Yang S, Lee C Y, Zhang J, Bishop A, et al. Fast contact-implicit model predictive control. *IEEE Transactions on Robotics*, 2024, **40**: 1617–1629
- 73 Pimentel M, Basiri M. A bimodal rolling-flying robot for micro level inspection of flat and inclined surfaces. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, **7**(2): 5135–5142
- 74 Huang W C, Aydinoglu A, Jin W X, Posa M. Adaptive contact-implicit model predictive control with online residual learning. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Yokohama, Japan: IEEE, 2024. 5822–5828
- 75 Cao M Q, Xu X H, Yuan S H, Cao K, Liu K C, Xie L H. DoubleBee: A hybrid aerial-ground robot with two active wheels. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Detroit, USA: IEEE, 2023. 6962–6969
- 76 Baggio G, Bassett D S, Pasqualetti F. Data-driven control of complex networks. *Nature Communications*, 2021, **12**(1): Article No. 1429
- 77 Xu X H, Yang Y Z, Cao M Q, Nguyen T M, Cao K, Xie L H. A data-driven control method for ground locomotion on sloped terrain of a hybrid aerial-ground robot. *Journal of Automation and Intelligence*, 2024, **3**(4): 219–229
- 78 Li Q, Tan T, Wang B L, Yan Z M. Avian-inspired embodied perception in biohybrid flapping-wing robotics. *Nature Communications*, 2024, **15**(1): Article No. 9099
- 79 Shin W D, Phan H V, Daley M A, Ijspeert A J, Floreano D. Fast ground-to-air transition with avian-inspired multifunctional legs. *Nature*, 2024, **636**(8041): 86–91
- 80 Hammad A, Armanini S F. Landing and take-off capabilities of bioinspired aerial vehicles: A review. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2024, **19**(3): Article No. 031001
- 81 Boria F J, Bachmann R J, Ifju P G, Quinn R D, Vaidyanathan R, Perry C, et al. A sensor platform capable of aerial and terrestrial locomotion. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Edmonton, Canada: IEEE, 2005. 3959–3964
- 82 Coleman D, Gakhar K, Benedict M, Tran J, Siroh J. Aeromechanics analysis of a hummingbird-like flapping wing in hover. *Journal of Aircraft*, 2018, **55**(6): 2282–2297
- 83 Tu Z, Hui C, Liu L M, Zhou Y M, Romano D R, Deng X Y, et al. Crawl and fly: A bio-inspired robot utilizing unified actuation for hybrid aerial-terrestrial locomotion. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, **6**(4): 7549–7556
- 84 Dhingra D, Kaheman K, Fuller S B. Modeling and LQR control of insect sized flapping wing robot. *npj Robotics*, 2025, **3**(1): Article No. 6
- 85 Zhao F Z, Wang X F, Zhu T H. Power dynamic decoupling control of grid-forming converter in stiff grid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, **37**(8): 9073–9088
- 86 Li Y H, Zhou Y H, Huang J B, Wang Z J, Zhu S J, Wu K R, et al. Jet-HR2: A flying bipedal robot based on thrust vector control. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, **7**(2): 4590–4597
- 87 Zhu H, Fan W, Xu B, Yang C, Bai W Q, Qin Y C, et al. Adaptive take-off controller of a land-air amphibious vehicle on unstructured terrain. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, **73**(2): 1817–1828
- 88 Thorington J R W, Darrow K, Anderson C G. Wing tip anatomy and aerodynamics in flying squirrels. *Journal of Mammalogy*, 1998, **79**(1): 245–250
- 89 Beck A, Zaitsev V, Ben H U, Kosa G, Ayali A, Weiss A, et al. Jump stabilization and landing control by wing-spreading of a locust-inspired jumper. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2017, **12**(6): Article No. 066006
- 90 Le T Q, van Truong T, Park S H, Quang T T, Ko J H, Park H C, et al. Improvement of the aerodynamic performance by wing flexibility and elytra-hind wing interaction of a beetle during forward flight. *Journal of the Royal Society Interface*, 2013, **10**(85): Article No. 20130312
- 91 Halefom M H, Hopwood J W, Woolsey C A. Unsteady aerodynamics in model-based wind estimation from fixed-wing aircraft motion. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2024, **47**(8): 1556–1568
- 92 Qin G D, Xu Y Z, He W, Qi Q, Zheng L, Hu H M, et al. Design and development of an air-land amphibious inspection drone for fusion reactor. *Drones*, 2024, **8**(5): Article No. 190
- 93 Fan W, Zhu H, Zhang Y B, Xu B, Xu T, Zhou X P, et al. Configuration optimization and adaptive controller design of a land-air amphibious vehicle for improved yaw capability. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2024, **10**(4): 10006–10018
- 94 Olivares D. Reinforcement Learning Based Control of a Fixed-wing UAV Under Wind Disturbances [Ph.D. dissertation], Universit  Paris-Saclay, France, 2025.
- 95 Chang Q, Yu B, Ji H W, Li H F, Yuan T T, Zhao X Y, et al. Design and control of a reconfigurable robot with rolling and

- 127 flying locomotion. *Actuators*, 2024, **13**(1): Article No. 27
- 96 Tan Q F, Zhang X Y, Liu H P, Jiao S Y, Zhou M, Li J. Multimodal dynamics analysis and control for amphibious fly-drive vehicle. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2021, **26**(2): 621–632
- 97 Matus-Vargas A, Rodríguez-Gomez G, Martínez-Carranza J. Ground effect on rotorcraft unmanned aerial vehicles: A review. *Intelligent Service Robotics*, 2021, **14**(1): 99–118
- 98 Boschetti P J, Neves C A, González P J. Nonlinear aerodynamic model in dynamic ground effect at high angles of attack. *Journal of Aircraft*, 2022, **59**(6): 1500–1513
- 99 Wei H L, Lou B C, Zhang Z Z, Liang B H, Wang F Y, Lv C. Autonomous navigation for eVTOL: Review and future perspectives. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2024, **9**(2): 4145–4171
- 100 Mandralis I, Nemovi R, Ramezani A, Murray R M, Gharib M. ATMO: An aerially transforming morphobot for dynamic ground-aerial transition. *Communications Engineering*, 2025, **4**(1): Article No. 74
- 101 Hyun N S P, Chan C M, Hernandez A M, Wood R J. Sticking the landing: Insect-inspired strategies for safely landing flapping-wing aerial microrobots. *Science Robotics*, 2025, **10**(101): Article No. eadq3059
- 102 Choi H C, Wee I, Corah M, Sabet S, Kim T, Touma T, et al. BAXTER: Bi-modal aerial-terrestrial hybrid vehicle for long-endurance versatile mobility. *Experimental Robotics*. Cham, Switzerland: Springer, 2021. 60–72
- 103 Yang B Q, Dong X, Li H Z, Zhang J H, Xiang J W, Li D C, et al. An ultralight air-ground vehicle capable of sustained amphibious maneuverability and bio-inspired modality transition. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2024, **9**(11): 9351–9358
- 104 Xu Y, Zhang W T, Peng L, Zhou Q J, Li Q, Shi Q. A locust-inspired robot capable of continuous crawl-jump-gliding locomotion with optimized transitional control. *IEEE Transactions on Robotics*, 2025, **41**: 220–235
- 105 Vidyasagar A, Zufferey J C, Floreano D, Kovač M. Performance analysis of jump-gliding locomotion for miniature robotics. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2015, **10**(2): Article No. 025006
- 106 Siddall R, Byrnes G, Full R J, Jusufi A. Tails stabilize landing of gliding geckos crashing head-first into tree trunks. *Communications Biology*, 2021, **4**: Article No. 1020
- 107 van Truong T, Kim J, Kim M J, Park H C, Yoon K J, Byun D. Flow structures around a flapping wing considering ground effect. *Experiments in Fluids*, 2013, **54**(7): Article No. 1575
- 108 Zheng Z, Wang J, Wu Y Z, Cai Q F, Yu H, Zhang R B, et al. Roller-quadrotor: A novel hybrid terrestrial/aerial quadrotor with unicycle-driven and rotor-assisted turning. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Detroit, USA: IEEE, 2023. 6927–6934
- 109 Paskins K E. The Mechanics and Energy Economy of Animal Jumping and Landing Applied to Autonomous Robots [Ph.D. dissertation], University of Bath, UK, 2007.
- 110 Paskins K E, Bowyer A, Megill W M, Scheibe J S. Take-off and landing forces and the evolution of controlled gliding in northern flying squirrels *glaucomys sabrinus*. *Journal of Experimental Biology*, 2007, **210**(8): 1413–1423
- 111 Gorgulu Y F, Ozgur M A. Aerodynamic enhancement of wind turbine blades through peregrine falcon-inspired surface designs. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2025, **44**(6): Article No. e70060
- 112 Jusufi A, Goldman D I, Revzen S, Full R J. Active tails enhance arboreal acrobatics in geckos. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, **105**(11): 4215–4219
- 113 Ai B, Tian S P, Shi H C, Wang Y X, Pfaff T, Tan C, et al. A review of learning-based dynamics models for robotic manipulation. *Science Robotics*, 2025, **10**(106): Article No. eadt1497
- 114 Li Y Y, Wang Y Q, Liu Y, He J W, Fan L, Zhang Z X. End-to-end driving with online trajectory evaluation via BEV world model. In: Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). Honolulu, USA: IEEE, 2025. 27137–27146
- 115 Xu M K, Powers A S, Dror R O, Ermon S, Leskovec J. Geometric latent diffusion models for 3D molecule generation. In: Proceedings of the 40th International Conference on Machine Learning (ICML). Honolulu, USA: PMLR, 2023. 38592–38610
- 116 Reiser P, Neubert M, Eberhard A, Torresi L, Zhou C, Shao C, et al. Graph neural networks for materials science and chemistry. *Communications Materials*, 2022, **3**(1): Article No. 93
- 117 Qi Z, Meng L, Li Z C, Hu H, Meng X X. Cross-silo feature space alignment for federated learning on clients with imbalanced data. In: Proceedings of the 39th AAAI Conference on Artificial Intelligence. Philadelphia, USA: AAAI, 2025. 19986–19994
- 118 Chen S J, Zhang Y, Yang Q. Multi-task learning in natural language processing: An overview. *ACM Computing Surveys*, 2024, **56**(12): Article No. 295
- 119 Vettoruzzo A, Bouguelia M R, Vanschoren J, Rognvaldsson T, Santosh K C. Advances and challenges in meta-learning: A technical review. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2024, **46**(7): 4763–4779
- 120 Domínguez-Vidal J E, Rodríguez N, Sanfeliu A. Perception-intention-action cycle in human-robot collaborative tasks: The collaborative lightweight object transportation use-case. *International Journal of Social Robotics*, 2025, **17**(10): 1927–1956
- 121 Shi L, Li B C, Matusik W. End-to-end learning of 3D phase-only holograms for holographic display. *Light: Science & Applications*, 2022, **11**(1): Article No. 247
- 122 Janson G, Valdes-Garcia G, Heo L, Feig M. Direct generation of protein conformational ensembles via machine learning. *Nature Communications*, 2023, **14**(1): Article No. 774
- 123 Rani V, Nabi S T, Kumar M, Mittal A, Kumar K. Self-supervised learning: A succinct review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2023, **30**(4): 2761–2775
- 124 Welte E, Rayyes R. Interactive imitation learning for dexterous robotic manipulation: Challenges and perspectives—A survey. *Frontiers in Robotics and AI*, 2025, **12**: Article No. 1682437
- 125 Morilla-Cabello D, Westheider J, Popović M, Montijano E. Perceptual factors for environmental modeling in robotic active perception. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Yokohama, Japan: IEEE, 2024. 4605–4611
- 126 Qian C, Kaminer I, Chen H S. A guidance to intelligent metamaterials and metamaterials intelligence. *Nature Communications*, 2025, **16**(1): Article No. 1154
- 127 Chen C, Shi P J, Liu Z X, Duan S D, Si M Q, Zhang C W, et al. Advancing physical intelligence for autonomous soft robots. *Science Robotics*, 2025, **10**(102): Article No. eads1292



李欣茹 北京航空航天大学博士研究生。2025 年获得山东大学机械设计制造及其自动化专业学士学位。主要研究方向为仿生微型跨域机器人设计与控制。

E-mail: by2507113@buaa.edu.cn

(LI Xin-Ru Ph.D. candidate at Beihang University. She received her bachelor degree

in mechanical design, manufacturing and automation from Shandong University in 2025. Her research interests include the design and control of bionic micro cross-domain robots.)



王家添 北京航空航天大学硕士研究生. 2025 年获得哈尔滨工业大学机器人工程专业学士学位. 主要研究方向为仿生微型跨域机器人设计.

E-mail: 18059840827@buaa.edu.cn

(**WANG Jia-Tian** Master student at Beihang University. He received

his bachelor degree in robotics engineering from Harbin Institute of Technology in 2025. His main research interest is the design of bionic micro cross-domain robots.)

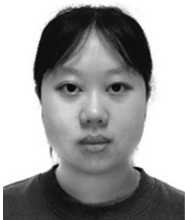


陈一同 北京航空航天大学博士研究生. 2023 年获得大连理工大学机械工程专业硕士学位. 主要研究方向为机器人设计、路径规划与控制.

E-mail: by2307136@buaa.edu.cn

(**CHEN Yi-Tong** Ph.D. candidate at Beihang University. He received

his master degree in mechanical engineering from Dalian University of Technology in 2023. His research interests include the design, path planning and control of robots.)

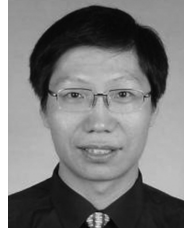


金艺畅 北京航空航天大学硕士研究生. 2024 年获得北京航空航天大学机器人工程专业学士学位. 主要研究方向为微型机器人设计.

E-mail: zy2407702@buaa.edu.cn

(**JIN Yi-Chang** Master student at Beihang University. She received

her bachelor degree in robotics engineering from Beihang University in 2024. Her main research interest is the design of micro robots.)



丁希仑 北京航空航天大学教授. 1997 年获得哈尔滨工业大学机电控制及自动化专业博士学位. 主要研究方向为机器人机构学与仿生机器人.

E-mail: xlding@buaa.edu.cn

(**DING Xi-Lun** Professor at Beihang University. He received his

Ph.D. degree in mechatronic control and automation from Harbin Institute of Technology in 1997. His research interests include robot mechanisms and bionic robots.)



张容静 北京航空航天大学教授. 2022 年获得格罗宁根大学机械工程专业博士学位. 主要研究方向为微型软体机器人与仿生跨域机器人.

E-mail: rongjing@buaa.edu.cn

(**ZHANG Rong-Jing** Professor at Beihang University. She received

her Ph.D. degree in mechanical engineering from the University of Groningen in 2022. Her research interests include micro soft robots and bionic cross-domain robots.)



王成才 北京航空航天大学教授. 2022 年获得北京大学力学专业博士学位. 主要研究方向为仿生机器人设计及集群与仿生跨域机器人. 本文通信作者.

E-mail: cc_wang@buaa.edu.cn

(**WANG Cheng-Cai** Professor at

Beihang University. He received his Ph.D. degree in mechanics from Peking University in 2022. His research interests include bionic robot design, swarm robots, and bionic cross-domain robots. Corresponding author of this paper.)